

Päivi Liejumäki

# KORTTELIKOHTAINEN ENERGIANTUOTANTO

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Diplomityö  
Lokakuu 2019

# TIIVISTELMÄ

Päivi Liejumäki: Korttelikohtainen energiantuotanto  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Ympäristö- ja energiatekniikka  
Lokakuu 2019

---

Tässä työssä selvitettiin korttelikohtaisen energiantuotannon soveltuvuutta asuin- ja liikerakentamisen yhteyteen. Lähtökohtana energiantuotantoratkaisuille pidettiin Lempäälän Marjamäen yritysalueelle tulevan LEMENE-energiayhteisön ratkaisuja. Sähkö tuotetaan aurinkopaneeleilla ja kaasumoottorilla. Lämpöä saadaan kaasumoottorin jäähdytyksestä sekä savukaasuista. Lisäksi sähköenergiaa varastoidaan akkuihin. Polttokennot ovat osana LEMENEn ratkaisuja, mutta eivät ole mukana tässä korttelikohtaisessa energiantuotannon tarkastelussa.

Pääpaino työssä on lämpövirtaamien ja -tehojen selvityksellä eri lämmitysverkostoissa esimerkkikohteissa. Lisäksi työssä selvitetään sähkönkäyttö ja jäähdytysenergian tarve esimerkkikohteessa. Tässä työssä tarkasteltiin myös sähköenergian tarpeen lisäystä erilaisilla sähköautojen latausmäärillä. Tehdyn tarkastelun avulla mitoitettiin optimaaliset kaasumoottorit erilaisilla sähköautolatauksien määrillä. Kaasumoottorista saatavan lämmön käyttöä tarkasteltiin laskeamalla pääasiakkaan lämmöntarve ja siitä yli jäävän lämpöenergian määrä. Ylijäävän lämmön riittävyttä muille asiakkaille sekä mahdollisuutta käyttää ylimenevää lämpöä kaukokylmän tuotantoon selvitettiin.

Kaasumoottorista saatavaa lämpöä ei alhaisen lämpötilan vuoksi voida käyttää perinteisessä kaukolämpöverkossa, joten sen käyttö vaatii erillisen matalalämpötilaisen lämpöverkoston lämmöntuotantopaikasta asiakkaalle. Tarkasteltavassa esimerkissä lämpöä ei jää juurikaan muille asiakkaille myytäväksi talviaikana johtuen kohteen ulkoalueiden sulanapitojärjestelmän lämpöenergian tarpeesta. Koska korttelikohtainen energiantuotanto tässä tarkastelutapauksessa tulee lämpölaitoksen yhteyteen ja keväästä syksyyn perinteisen kaukolämpöjärjestelmään menevän veden lämpötila on alhaisempi, voidaan ylijäämälämpö myydä suoraan nykyisille kaukolämmön asiakkaille. Kaukokylmän tuotantoon ylijäämälämpöä voisi myös käyttää, mutta tällöin lämpöenergian tulisi olla lähes ilmaista. Jatkoselvityksenä kannattaisi tutkia lämpöpumpun käyttöä yhdistettyyn kylmän- ja lämmöntuotantoon.

Lisäksi työssä selvitetään Euroopan unionin, Suomen ja paikallisen tason energia- ja ilmastostrategioita ja niiden pohjalta asetettua lainsäädäntöä sekä erilaisia hankkeita ja tukimuotoja. Lainsäädännön nopea kehittyminen muuttaa toimintaympäristöä, jossa tällaisiakin hankkeita kehitetään.

Avainsanat: energiayhteisö, paikallinen energiantuotanto, pien-CHP

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Päivi Liejumäki: Energy production in a city block  
Master's thesis  
Tampere University  
Environmental and Energy Engineering  
October 2019

---

In this work was studied suitability of local energy production for area with residential and commercial construction. A starting point for energy production solutions is the solutions, which are used in energy community LEMENE. LEMENE energy community is founded in the business area Marjamäki in Lempäälä. Electricity power is generated in solar panels and in gas engines. Heat is obtained from the cooling of gas engines and from flue gases. Electricity is stored in batteries. Fuel cells are part of LEMENE solutions, but not used in this review of energy production.

The main focus of this work is on the study of thermal power and flows in thermal systems in selected buildings. In addition, use of electricity and the need for cooling energy is investigated. The change in electric power consumption by different amounts of electric cars in charge is calculated. According to electricity usage, the optimal gas engines were dimensioned with different amounts of electric car charging. The use of heat, which is getting from cooling of gas engines and from flue gases, is considered. The heating power demand of one customer's building and amount of heat energy remaining for other use is calculated, as well as the possibility of using excess heat power for district cooling production.

Because of the low temperature, the heat power from the gas engine cannot be used in a traditional district heating systems. It requires a separate low temperature heating systems for the customer. In this example, heat power is not produced enough to other customers during the winter due to the need for heat power in the snow melting system for passages. Local energy production will be situated in the same place than the district heating plant. Because the temperature of the outgoing water in the traditional district heating system from spring to autumn is lower than the wintertimes, the surplus heat power can be sold directly to existing district heat customers. Surplus heat power could also be used for district cooling production, but the thermal energy should be almost free of charge to make production profitable. As a follow-up study, it would be advisable to study the use of a heat pump for combined cold and heat production.

In addition, work on energy and climate strategies at European, Finnish and local level, and the legislation based on them, as well as various projects and forms of support, will be studied. The rapid development of legislation changes the environment in which such projects are developed.

Keywords: energy community, local energy production, small-scale CHP

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

## ALKUSANAT

Aiheen diplomityölleni sain Lempäälän Lämpö Oy:n toimitusjohtaja Toni Laaksolta, LEMENE-hankkeen ideoijalta. Työn aihe on hyvin ajankohtainen ja tämän opinnäytetyön tekeminen oli hyvin mielenkiintoinen prosessi. Kiitos tästä Tonille.

Työnantajani Lempäälän kunta pyrkii hiilineutraaliksi ja sitä kautta ennakkoluulottomasti suhtautuu kehityshankkeisiin, jotka osaltaan vievät kohti tavoitetta. Kiitos tästä.

Lempäälän kuntakeskuksen kaavoituksessa ja kehityksessä antaumuksella työtään tekeviä Maija Villasta ja Lari Laaksoa kiitän taustatiedoista ja hyvästä yhteistyöstä tämänkin työn aikana.

Kiitän myös muita työkavereitani, joilta olen saanut tukea ja tsemppausta tämän työn tekemiseen. Erityisesti kiitän Lempäälä-talon projektipäällikkö Ulla Palo-ojaa sekä esimiestäni rakennuttamispäällikkö Mervi Järvistä myötämielisyydestä opintojani kohtaan. Samoin kiitän Lempäälä-talon elinkaarisuunnittelija Eric Larssonia Sweco Talotekniikka Oy:stä avusta ja lähtötiedoista koskien Lempäälä-talon energiamallinnusta.

Kiitän diplomityön ohjaajaa ja tarkastajaa Seppo Syrjälää hyvästä yhteistyöstä, joka alkoi jo kandidaatintyöni ohjaamisesta. Lisäksi kiitän loppuvaiheessa toiseksi tarkastajaksi työhön liitettyä professori Jukka Konttista.

Kiitän myös perhettäni tuesta työtä tehdessä.

Tampereella, 24.10.2019

Päivi Liejumäki

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	LÄHTÖKOHDAT KORTTELIKOHTAISELLE ENERGiantuotannolle LEMPÄÄLÄN KUNTAKESKUKSESSA .....	4
2.1	LEMENE-hanke.....	4
2.2	Lempäälän kuntakeskuksen kehittäminen ja sen energiaratkaisut.....	7
2.2.1	Lempäälä-talo ja pysäköntilaitokset.....	8
2.2.2	Muu kuntakeskukseen tuleva rakennuskanta .....	8
2.2.3	Energiantuotanto kuntakeskuksessa.....	9
2.3	Miten energiayhteisöhankeiden erilaisuus vaikuttaa lähtökohtiin .....	10
3.	YHTEISKUNNALLISET RAJOITTEET JA MAHDOLLISTAJAT .....	13
3.1	Poliittiset strategiat ja sopimukset.....	13
3.1.1	Euroopan unionin tavoitteet ja toimet.....	13
3.1.2	Suomen tavoitteet ja toimet.....	16
3.1.3	Maakunnalliset ja seutukunnalliset tavoitteet .....	18
3.1.4	Kunnan omat strategiat ja sopimukset .....	19
3.2	Yhteiskunnan taloudellinen ohjaus .....	19
3.2.1	Verot.....	19
3.2.2	Päästökauppa.....	20
3.2.3	Tuet ja hankkeet .....	20
4.	ENERGIANKULUTUS RAKENNUKSISSA .....	22
4.1	Lämpöenergian tarpeen laskeminen rakennuksessa.....	22
4.2	Ulkoalueiden sulanapitojärjestelmän energiankulutus.....	27
4.3	Lämmitysverkostojen mitoitus ja ohjaus .....	29
4.3.1	Rakennuksen lämmitysverkostot .....	30
4.3.2	Sulanapitoverkosto.....	31
4.3.3	Kaukolämpöverkosto .....	32
5.	ENERGIANTUOTANTO PIENISSÄ ALUEELLISISSA RATKAISUISSA .....	34
5.1	Aurinkopaneelit.....	35
5.2	Kaasumoottori yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa.....	35
5.3	Energiavarastot.....	37
5.4	Kaukokylmä alueellisena ratkaisuna .....	38
5.4.1	Vapaajäähdytys .....	38
5.4.2	Kompressorijäähdytys.....	39
5.4.3	Lämpöpumpputekniikat .....	39
5.4.4	Lämpöä hyväksi käyttävät tekniikat .....	40
5.4.5	Kylmän varastointi.....	42
5.5	Esimerkkejä Suomesta pien-CHP:sta ja alueellisista energiaratkaisuista .....	42
6.	JÄRJESTELMÄT JA MITOITUKSET .....	44
6.1	Kaukolämpöverkon lämpötilatasot ja tehonvaihtelut.....	44
6.2	Lämmitysenergian kulutus ja verkostot rakennuksissa .....	47

6.2.1	Lempäälä-talon lämmitysverkostot.....	47
6.2.2	Asuinkerrostalojen tehontarpeet ja lämpövirrat.....	54
6.3	Lempäälä-talon ja pysäköintilaitosten sähkönkulutus.....	56
6.4	Korttelikohtainen energiantuotanto.....	57
6.4.1	Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto kaasumootorilla .....	58
6.4.2	Kaukokylmä.....	63
7.	TULOSTEN ANALYSOINTI.....	65
7.1	Tulokset.....	65
7.2	Jatkotoimenpiteet .....	67
8.	YHTEENVETO .....	70
	LÄHTEET.....	73

# 1. JOHDANTO

Valtiot kautta maailman ovat sitoutuneet Pariisin ilmastopimukseen ja sitä kautta tähtäävät yhteisesti ilmaston lämpenemisen rajoittamiseen 1,5 asteeseen verrattuna esiteolliseen aikaan. Euroopan unionissa tehdään strategioita ja lainsäädäntöä sekä erilaisia hankkeita tavoitteisiin pääsemiseksi. Myös Suomen hallitus on tehnyt Euroopan unionin ja omien tavoitteidensa pohjalta oman strategian tavoitteisiin pääsemiseksi. Osa kunnista ja seutukunnista on asettanut myös omia tavoitteita ilmastomuutoksen hillitsemiseksi. Kuntien ja kaupunkien omat tavoitteet ovat yleensä kunnianhimoisempia kuin valtiolliset tai kansainväliset tavoitteet. Esimerkiksi Lempäälän kunta on kuntastrategiassaan 2018-2025 yhdeksi painopisteeksi määritellyt edelläkävijyyden energiantuotannossa ja kierrätyksessä. Tavoitteena on vähentää kasvihuonepäästöjä 80 % vuoden 2007 tasosta vuoteen 2030 mennessä.

Hallitustenvälinen ilmastopaneeli IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) julkaisi lokakuussa 2018 erikoisraportin, jossa esitellään toimia, joilla voidaan lämpeneminen rajoittaa 1,5 °C verrattuna esiteolliseen aikaan. Raportissa on tarkasteltu myös vaikutuksia, jos ilmasto lämpenisi 2 °C. Raportin mukaisesti vaikutukset jo 1,5 °C ilmaston lämpenemisellä ovat suuremmat kuin aiemmin arvioitu. Lisäksi vaikutukset ovat huomattavasti vakavammat, jos ilmasto lämpenee 2 °C. Esimerkiksi vedenpuutteesta kärsivien ihmisten määrä sekä valtaosan elinympäristöjään menettävien eläin- ja kasvilajien lukumäärä kasvaa kaksinkertaiseksi jo tuolla 1,5 °C erolla. Jotta lämpeneminen voidaan rajoittaa 1,5 °C:een, tarvitaan nopeita ja radikaaleja muutoksia tuotannossa ja kulutuksessa. Kulutukseen ja tuotantoon vaikuttavien toimien lisäksi tarvitaan myös hiilidioksidin poistamista ilmakehästä. (IPCC 2018)

Ilmastomuutoksen vastainen työ vaatii siis monenlaisia toimia niin energiantuotannon ja -kulutuksen, maankäytön, liikenteen kuin teollisuuden saralla. Yhtenä suurimmista toimista on fossiilisten polttoaineiden käytön lopettaminen. Uusiutuvan energian lisääntyvä käyttö tuo tullessaan vaikutuksia energiaverkostoihin. Tuuli- ja aurinkoenergiaa voidaan tuottaa vain silloin, kun niitä on saatavilla. Ydinvoimaa taas tuotetaan tasaisesti, mutta sitäkään ei voida käyttää säätövoimana. Myös liikenteen muutos ja sitä kautta sähköisten ajoneuvojen lisääntyminen lisäävät sähkön käyttöä. Tulevaisuudessa tarvitaan siis lisää sekä säätövoimaa että energiavarastoja, joilla saadaan energiaverkostoihin tarvittava määrä energiaa oikeaan aikaan. Myös kysyntäjoustolle eli sille, että energian käyttöä voidaan sopeuttaa ja kulutushuippuja tasata, on tulevaisuudessa yhä enemmän tarvetta.

Yhtenä keinona sekä uusiutuvan energian käytön lisäämiseen että energiaverkostojen joustoihin ja energiavarastojen lisäämiseen ovat paikalliset energiantuotannon ja -käytön

energiayhteisöt. Energiayhteisössä voidaan oman tuotannon ja kulutuksen lisäksi tuottaa tai hankkia energiaa ulkopuolelta ja näin tasata myös muiden energiaverkostojen käyttöä.

Lempäälän Marjamäen yritysalueella on käynnissä Lempäälän energiayhteisö- eli LEMENE-hanke. LEMENE-hankkeessa energiaa tuotetaan aurinkopaneeleilla, polttokennoilla ja kaasumoottorilla. Tämän lisäksi asiakkaiden omien resurssien jakaminen eli esimerkiksi oman aurinkoenergian tuotannon tai hukkalämmön hyödyntäminen naapurikiinteistöllä on energiayhteisössä mahdollisia. Hankkeen sähköenergian varastointiin käytetään akustoja. Sähköä voidaan lisäksi ostaa tai myydä julkiseen sähköverkkoon. Keskeisessä roolissa energiayhteisössä on niin energiantuoton, -kulutuksen kuin energiavarastojen ohjaus edistynyt automaatiikkaa hyväksi käyttäen.

Lempäälän kuntakeskus on voimakkaassa muutoksessa. Kuntakeskukseen rautatieaseman tuntumaan tavoitellaan jopa 10 000 asukasta. Tiivistyvä asemanseutu tarkoittaa, että alueelle tehdään paljon uudisrakentamista. Lähes koko ydinkeskusta rakennetaan tulevien vuosien aikana uudelleen. Ensimmäisinä ydinkeskustaan on valmistumassa Lempäälätalo, johon on tulossa pääkirjasto, toimistoja, liiketiloja sekä pysäköintilaitos. Lempäälätalon rakentamisessa on huomioitu energiatehokkuus ja rakennus tavoittaa A-energialuokan. Kuntastrategiansa mukaisesti Lempäälän kunta haluaa edistää energian lähituotantoa sekä kokeellisia hankkeita. Siksi nähdään tarpeelliseksi selvittää korttelikohtaista energiantuotantoa Lempäälän kuntakeskuksessa.

Tämän työn tavoitteena oli tutkia, miten LEMENE-hankkeessa toteutettuja ratkaisuja voidaan tuoda toisenlaiseen ympäristöön. Eli miten korttelikohtainen energiantuotanto soveltuu asumisen- ja liiketilojen sekä julkisten rakennusten käyttöön Lempäälän kuntakeskuksessa. Pääpaino työssä oli lämpötehojen ja lämpövirtaamien selvittämisellä. Työssä tarkasteltiin korttelikohtaisen energiantuotannon sähköenergian käyttäjien Lempäälätalon ja pysäköintilaitosten sähkönkulutusta. Sähkönkulutuksen avulla mitoitettiin kaasumoottorit. Sähköenergian varastointi akkuihin on osana korttelikohtaisen energiantuotannon kokonaisuutta. Tässä työssä ei mitoitettu akkukapasiteettia, vaan oletettiin sitä olevan kylliksi käytössä 24 tunnin tarpeisiin. Lämpöenergiaa saadaan sähköntuotannon sivutuotteena. Työssä selvitettiin lämpöenergian riittävyyttä Lempäälätalon käyttöön. Ylijäävän lämpöenergian käyttöä muille lämpöasiakkaille sekä kaukojäähdytyksen tuotantoon selvitettiin. Lisäksi paneuduttiin energiapolitiikan linjauksiin Euroopassa, Suomessa ja paikallisella tasolla. Energiapolitiikan linjaukset vaikuttavat strategioihin, lainsäädäntöön sekä taloudelliseen tukeen ja ohjaukseen. Kaikki nämä vaikuttavat myös ruohonjuuritasolla tehtäviin hankkeisiin.

Tutkimusmetodeina käytetään aikaisempien tutkimusten ja opinnäytetöiden selvitystä, tutustumista alan lainsäädäntöön ja käytänteisiin. Lähdeaineistona käytetään LEMENE-hankkeen tietoja, lämpölaitoksen kulutustietoja, Lempäälätalon sekä esimerkkikerrostalon suunnitteluajankaisia dynaamisen energialaskennan tuloksia. Ulkoalueiden sulanapito-



järjestelmän energiankulutus mallinnetaan tuntitasoisesti tätä työtä varten. Saatujen lähtötietojen avulla lasketaan eri järjestelmien lämpötehot ja -virtaamat tuntitasoisena tarkasteluna.

Tässä julkaisussa perehdytään ensin Lempäälän kuntakeskuksen alueen kehittämiseen sekä LEMENE-hankkeeseen. Pohditaan hankkeiden samankaltaisuuksia ja sitä, missä hankkeet eroavat toisistaan. Luvussa 3 käsitellään ilmastonmuutoksen vastaista työtä Euroopan unionin, valtakunnallisten ja paikallisten poliittisten strategioiden ja ohjauksen kautta. Strategioilla ja niiden pohjalta tehdyllä lainsäädännöllä on huomattava merkitys alan toimintaan. Erilaisten tukien ja hankkeiden käynnistymisen myötä on mahdollista saada myös erilaisia taloudellisia avustuksia. Työssä esitellään lyhyesti myös muutamia Suomessa käynnissä olevia paikallisen tason energiahankkeita. Luvussa 4 käsitellään rakennusten energiankulutusta ja rakennusten lämpöverkostojen mitoittamista ja ohjauksen periaatteita. Tämän jälkeen perehdytään hankkeen energiantuotannossa käytettäviin kaasumootoreihin, aurinkopaneeleihin, jäähdytysenergian tuotantovaihtoehtoihin sekä energiavarastoihin. Järjestelmät ja mitoittukset on esitetty luvussa 6. Lopuksi käydään vielä läpi päätulokset ja ehdotukset jatkotoimenpiteiksi.

## 2. LÄHTÖKOHDAT KORTTELIKOHTAISELLE ENERGiantuotannolle LEMPÄÄLÄN KUNTAKESKUKSESSA

Tarkoituksena tässä työssä on tutkia, miten korttelikohtainen energiantuotanto soveltuu Lempäälän kuntakeskuksen alueelle. Lempäälän kuntakeskus on suuren muutoksen alla. Lempäälän kunta on solminut seudullisen maankäyttöä, asumista ja liikennettä koskevan MAL-sopimuksen valtion kanssa. MAL-sopimuksen mukaisesti tavoitellaan jopa 10 000 asukkaan sijoittumista Lempäälän kuntakeskukseen. Tämä vaatii paljon uudisrakentamista tulevien vuosien aikana.

Lähtökohtana Lempäälän kuntakeskuksen korttelikohtaiselle energiantuotannolle on Lempäälän Marjamäessä käynnissä olevan energiaomavaraisen teollisuus- ja liikerakentamisen rakennusten hankkeessa LEMENE:ssä toteutetut energiaratkaisut.

### 2.1 LEMENE-hanke

Marjamäen yritysalue on yli 300 hehtaarin liike- ja teollisuusalue, jolle on mahdollista rakentaa yhteensä yli 500 000 kerrosneliömetriä yritystiloja. Jo tällä hetkellä Marjamäessä toimii yli 300 yritystä, joista tunnetuin on kauppakeskus Ideapark. (Lempäälän Kehitys 2018) Marjamäen alueelle on viime vuosina rakennettu paljon uutta rakennuskantaa ja tulevana vuosina rakentaminen jatkuu. Marjamäen yritysalueella on toimintaa aloittamassa energiayhteisö LEMENE. Hankkeen tuotantoalueet on hahmoteltu kuvassa 1.



**Kuva 1** Hahmotelma LEMENE-hankkeen tuotantoalueista. Lähde: Lempäälän Energia

Energiayhteisössä ovat mukana Lempäälän Energia Oy sekä alueella toimivia teollisuuden ja kaupan alan yrityksiä rakennuksineen. Energiayhteisön tavoitteena on saavuttaa alueen energiaomavaraisuus sekä edistää eri toimijoiden resurssien jakamista. Energiayhteisö tuottaa itse tarvitsemansa energian hyödyntäen uusiutuvaa energiaa ja kehittänyt teknologiaa. Energiayhteisön käytännön toteutuksesta vastaa Lempäälän Energia Oy, joka on Lempäälän Lämpö Oy:n tytäryhtiö. Lempäälän Lämpö Oy ja Lempäälän Energia Oy ovat Lempäälän kunnan täysin omistamia yrityksiä. Lempäälän Energia Oy operoi verkostoa, tuottaa ja myy lämpöä ja sähköä sekä myy kaasua. Hanke lähti käyntiin vuonna 2016 ja valmistuu vuonna 2019. Hankkeeseen on saatu työ- ja elinkeinoministeriön uuden energiateknologian kärkihankerahoitusta 4,74 miljoonaa euroa. (Lempäälän Energia 2019)

LEMENE-energiayhteisön tarvitsema energia tuotetaan aurinkopaneelien, kaasumootoreiden ja polttokennojen avulla. Lisäksi energiayhteisö voi ostaa tai myydä energiaa. Sähköenergian varastointiin käytetään akkuja. Energiaverkkoja, energian tuotantoa, kulutusta ja varastointia sekä niiden välistä tasapainoa seurataan ja ohjataan kehittyntä automatiikkaa apuna käyttäen. Energiayhteisön energiaverkostot, myös sähköverkko, ovat suljettuja omia verkkoja. Kaukokylmäverkostoa LEMENE-hankkeen alueella ei ainakaan hankkeen alkuvaiheessa ole. Katuvalaistusta varten on oma tasajännitettä hyödyntävä verkko. LEMENE-hankkeen periaatteet esitetty kuvassa 2.



**Kuva 2.** LEMENE-hankkeen energiantuotanto ja -verkostot. Lähde: Lempäälän Energia.

Ensisijaisesti sähkö tuotetaan aurinkopaneelilla ja polttokennoilla. Jos sähköenergian tuotto ei riitä, käynnistetään kaasumootorit. Tehohippuja tasataan ja ylimääräinen sähköenergia varastoidaan akkuihin. Tärkeässä asemassa on asiakkaiden kysyntäjousto eli

kulutuksen joustaminen energiantuotannon mukaisesti sekä kulutuksen tehohuippujen tasaaminen niin lämpö- kuin sähköenergian osalta. Tämä edellyttää myös energiayhteisön asiakkaan automaatiojärjestelmien yhteensopivia rajapintoja energiayhteisön automaatiojärjestelmään.

LEMENE-energiayhteisön aurinkovoimala valmistuu vuonna 2019. Aurinkovoimala on jaettuna kahteen erilliseen osioon, joiden yhteisteho on 4 000 kWp. Aurinkopaneelit asennetaan maahan. Aurinkovoimala on valmistuessaan yksi Suomen suurimmista.

LEMENE-hankkeessa käytettävät polttokennot ovat kiinteäoksidi-polttokennoja (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell). Suunniteltujen polttokennojen yhteisteho on 116 kW. Sähkön lisäksi polttokennoista saadaan lämpöä aluelämpöverkostoon. Polttokennon hyötysuhde pysyy hyvänä, vaikka polttokennoa käytetään puolella teholla. Näin sitä voidaan käyttää myös osakuormille. Koska polttokennot energiantuotannossa eivät ole vielä kaupallista vakiintunutta tekniikkaa, niiden hinta on vielä korkea.

Energiayhteisön käyttöön on hankittu 6 kappaletta kaasumootoreita, joiden yhteenlaskettu sähköteho on 8 MW. Moottoreiden savukaasuista otetaan talteen lämpöä aluelämpöverkkoon. Koska sähköntuotannon hyötysuhde kaasumootoreilla on yleensä tässä kokoluokassa alle 40 %, jää hukkalämpöä hyödynnettäväksi yleensä hieman enemmän kuin sähkötehoa saadaan. Kaasumootoreita voidaan käyttää osateholla aina noin 40 % kuormitukseen saakka ilman hyötysuhteen suurta laskua. Tätä pienemmillä osatehoilla kaasumootoreita ei käytetä.

Polttoaineena kaasumootorissa sekä polttokennoissa voidaan käyttää joko maakaasua tai biokaasua. Maa- ja biokaasu hankitaan Gasumilta valtakunnallisesta verkosta. Lempäälässä on laaja Lempäälän Lämpö Oy:n omistama kaasuverkko. Biokaasun tuotantoa ei tällä hetkellä ole Lempäälässä paikallisen kaasuverkon alueella. Myöhemmin, jos alueelle rakennetaan biokaasun tuotantoa, on mahdollista hyödyntää myös paikallisesti tuotettua biokaasua energian tuotannossa. Tässä yhteydessä paikallisesti tuotetulla biokaasulla tarkoitetaan paikallisen verkon alueella tuotettua biokaasua. Kun kaasua ei kuljeteta kaasuverkkoyhtiö Gasumin verkostossa, siirtomaksut ovat edullisemmat.

Energiayhteisön akuista koostuvan energiavaraston koko on 1,6 MW. Tärkeänä osana energiavarastoa on ohjausjärjestelmä, jolla voidaan varmistaa sähköverkon tehokas käyttö ja hyödyntää optimaalisesti uusiutuvia energialähteitä.

Omien verkostojen avulla energiayhteisö mahdollistaa myös resurssien jakamisen yhteisön eri osapuolten kesken. Tällaisia resursseja ovat esimerkiksi yksittäisen asiakkaan oma aurinkoenergian tuotanto, kylmäntuotto ja hukkalämmöt. Kun energiayhteisön asiakas ei itse käytä kaikkea tuottamaansa energiaa, voi se siirtää tämän energian toisten käyttöön verkostoja pitkin.



### 2.2.1 Lempäälä-talo ja pysäköintilaitokset

Kunnan omana hankkeena kuntakeskukseen radan itäpuolelle rakennetaan Lempäälä-talo, johon tulee uusi kunnan pääkirjasto, kunnanvirastot, ravintola ja muuta liike- ja toimistotilaa sekä pysäköintilaitos. Lempäälä-talon yleissuunnitteluvaiheen 5.3.2018 päivättyjen suunnitelmien mukaan kerrosala on 8 906 k-m<sup>2</sup> ja bruttoala 17 936 m<sup>2</sup>. Bruttoalan ja kerrosalan välisen eron selittää pysäköintilaitos, jonka pinta-alaa ei lasketa kerrosalaan. Pysäköintilaitokseen tulee 301 pysäköintipaikkaa. Puolet pysäköintipaikoista varustetaan lämmitysrasioilla, jotka voidaan myöhemmin muuttaa sähköauton latauspaikoiksi. Sähköautojen latauspaikkoja yleissuunnitteluvaiheen suunnitelmien mukaan on tulossa 2 kappaletta rakennuksen käyttöönottovaiheessa.

Seuraavassa rakentamisvaiheessa itäpuolista pysäköintilaitosta on tavoitteena jatkaa etelään. Toinen pysäköintitalo on tavoitteena rakentaa junaradan länsipuolelle. Pysäköintilaitoksen käyttäjänä ovat Lempäälä-talon asiakkaiden ja henkilökunnan lisäksi alueen asukkaat ja esimerkiksi junamatkailijat, jotka jättävät autonsa liityntäparkkiin. Pysäköintilaitos on kokonaan kunnan omistuksessa ja sitä hallinnoimaan kunta on perustanut Lempon Parkki Oy nimisen yhtiön.

Kuntakeskusta halkovan junaradan päälle rakennetaan kävelysilta, joka yhdistää kuntakeskuksen itäisen ja läntisen puolen. Sillalta Puistotielle johtava kevyen liikenteen väylä Telkantaival kulkee Lempäälä-talon kirjasto- ja toimistorakennusten välistä. Koska väylällä on korkeuseroa, on liukkauden torjuntaa varten suunniteltu väylän sulanapito Lempäälä-talosta palaavaa kaukolämpöä hyödyntäen.

### 2.2.2 Muu kuntakeskukseen tuleva rakennuskanta

Kuntakeskuksen ydinalueelle junaradan itäpuolelle on jo rakennettu valmiiksi ensimmäinen kerrostalo ja kahden seuraavan kerrostalon rakennustyöt on aloitettu syksyllä 2018. Samassa yhteydessä sijaitsee kunnan omistama asemakaavoitettu kortteli, jonka tontti luovutetaan rakennettavaksi asumiselle. Tähän kortteliin on tulossa rakennusala yhteensä noin 10 000 k-m<sup>2</sup>. Lisäksi radan itäpuolella kuntakeskuksen ydinalueella on vielä kaksi erillistä kokonaisuutta, joiden asemakaavoitus on meneillään. Näille asuntoja ja liiketiloja on kaavailtu tulevaksi lähes 20 000 k-m<sup>2</sup>. Suurin osa rakennuskannasta tulee olemaan asuinrakennuksia.

Ydinkeskustan junaradan länsipuolelle ja ydinkeskustan kehän ulkopuoliselle keskusalueelle on lisäksi suunnitteilla runsaasti lisää rakentamista. Näiden alueiden suunnitelmat ovat vielä tarkentumatta. Korttelikohtaisen energiantuotannon kannalta kuitenkin merkittäväintä on rakentaminen ydinkeskustan kehän sisäpuolella varsinkin junaradan itäpuolella osuudella, koska lämpölaite sijaitsee itäpuolella rataa.

### 2.2.3 Energiantuotanto kuntakeskuksessa

Kuntakeskuksen ydinalueelle ja sen ympäristöön tulevien uusien rakennusten lisäksi kuntakeskuksen ydinkehän ulkopuolella on ajallisesti kerrostunutta rakentamista. Rakennukset lämpiävät pääosin kaukolämmöllä. Lempäälän Lämpö Oy tuottaa alueelle kaukolämmön.

Lempäälän Lämmön kaukolämpölaitoksista suurin sijaitsee ydinkeskustassa ja on suunnitelman mukaan jäämässä osaksi Lempäälä-talon pysäköintilaitoksen jatko-osan rakennusmassaa. Energialähteenä keskustan lämpölaitoksessa on maakaasu. Maakaasun etuja tiiviisti rakennetussa ympäristössä ovat sen vähäiset päästöt ja se, ettei polttoainevarastoja eikä polttoainekuljetuksia tarvita. Lämpölaitoksen jäämistä osaksi tulevaa rakennusmassaa suunnitellaan osana alueen asemakaavoitusta.

Maakaasu on myös korvattavissa uusiutuvista energialähteistä saatavalla biokaasulla ilman lisäinvestointeja. Biokaasun tuotanto voi olla paikallista tai biokaasua voi hankkia valtakunnallisesta Gasum Oy:n kaasuverkosta. Jo tällä hetkellä Lempäälän Lämmön pienasiakkaille sekä autojen tankkaukseen toimittama kaasu on pääsääntöisesti Gasumin verkosta hankittua biokaasua. Kaasuverkoston rakentaminen on huomattavasti edullisempaa kuin kaukolämpöverkostojen johtuen verkoston yksisuuntaisuudesta sekä pienemmästä putkikoosta ja alemmista lämpötilatasoista. Näin biokaasua voidaan tuottaa paikallisesti myös etäämmällä lämpölaitoksesta ja siirtää kaasu putkistoja pitkin käyttökohteeseen.

Lämpölaitoksen yhteyteen on tarkoitus sijoittaa korttelikohtaista sähkö- ja lämpöenergiantuotantoa palvelevat kaasumoottorit sekä akustot. Näin voidaan hyödyntää laitoksen automatiikkaa ja muuta tekniikkaa sekä savukaasujen poistossa lämpölaitoksen savupiippua. Aurinkopaneeleille on varattu tilaa Lempäälä-talon katolta ja mahdollisesti lisää tilaa aurinkopaneeleille saadaan keskuksen itäpuolelle myöhemmin rakennettavien rakennusten katoilta tai seinistä sekä myös radan länsipuolisen tulevan pysäköintilaitoksen yhteydestä.

Energiateollisuus ry on antanut määräykset ja ohjeet rakennusten kaukolämmityksestä (julkaisu K1). Näiden ohjeiden ja määräysten mukaan suunnitellaan yksittäisen rakennuksen kaukolämmityslaitteistot. (Energiateollisuus 2014a) Alueen vanhemmat rakennukset on mitoitettu vanhoilla, rakentamisaikana käytössä olleilla, kaukolämmityksen ohjejarvoilla. Näiden vanhojen ohjeiden mukaan mitoitettujen laitteistojen aiheuttama jäähdytymä kaukolämpöverkoston ei ole uusien rakennusten luokkaa. Uusissa rakennuksissa kaukolämpöverkoston lämmönvaihtimet tulee mitoittaa niin, että palaava kaukolämpöveden lämpötila on enintään 33°C (Energiateollisuus 2014a).

Paikallisen energiantuotannon lämpöenergian jakelu vaatii oman aluelämpöverkoston, koska kaasumoottorin hukkalämmöstä saatava aluelämpöverkoston veden menolämpötila on enimmillään 80-85°C. K1-julkaisun ohjeiden mukaisen kaukolämpöverkoston menolämpötila on enimmillään lämpöverkoston mitoituslämpötilassa 115°C. Mitoituslämpötilassa ulkolämpötila säävyöhykkeellä II, johon Tampereen seutukin kuuluu, on -29°C (Energiateollisuus 2014a). Tämä vaatii rakennuksen lämmityslaitteiston suunnittelua totuttua matalammalla lämpötilalla myös asiakkaan toisioverkostossa varsinkin mitoittaessa ilmanvaihtokoneen jälkilämmityspattereita, ilmanvaihtoverkostoa sekä kaukolämmön vaihtimia. Ilmanvaihtokoneiden jälkilämmityspattereiden mitoittaminen määräystä alemmalla lämpötilatasolla mahdollistaa myös muiden ylijäämälämpöjen hyödyntämisen lämmitykseen. Matalammasta mitoituslämpötilasta ja sen tuomista reunaehdoista johtuen matalalämpöistä aluelämpöä voidaan hyödyntää vain, jos reunaehdot on otettu huomioon järjestelmämitoituksessa. Siksi matalalämpöverkon asiakkaaksi aikovan taloyhtiön on jo suunnitteluvaiheessa oltava tietoinen vaatimuksista ja huomioitava lähtökohdat suunnittelussa. Lempäälä-talon suunnittelussa on huomioitu matalalämpöverkon vaatimukset.

Lempäälän kuntakeskuksessa on kaukokylmäverkko terveystakeskuksen ja hammashoitolan alueella vajaan kilometrin päässä ydinkeskustasta. Kaukokylmäverkostoa on tarkoitus laajentaa ydinkeskustan alueelle. Kaukokylmä tuotetaan terveystakeskukselle ja hammashoitolalle ensisijaisesti järvivedestä saatavalla vapaajäähdytyksellä. Kaukokylmälle tarvitaan kesän kuumimpina aikoina lisäjäähdytystä, joka tuotetaan tällä hetkellä kompressiojäähdytyksellä.

## **2.3 Miten energiayhteisöhankeiden erilaisuus vaikuttaa lähtökohtiin**

Lähtökohta kuntakeskuksen korttelikohtaiselle energiantuotannolle on monistaa LEMENE-hankkeen ratkaisut soveltuviin osin toisenlaiseen ympäristöön. Aurinkopaneelit, kaasumoottori, energiavarastot sekä älykäs automatiikka ovat peruspilarit kummassakin hankkeessa. Nämä mahdollistavat uusiutuvan energian käytön lisäämisen, huoltovarmuuden parantumisen ja verkkojen älykkään käytön. LEMENE-hankkeesta poiketen kuntakeskuksen korttelikohtaisessa energiantuotannossa ei tulla käyttämään polttokennoja energiantuotannossa.

Kokoluokaltaan hankkeet ovat erilaisia. LEMENE-hanke on suhteellisen suuri yritysalueen hanke. Lempäälän kuntakeskuksen korttelikohtainen energiantuotannon hanke on energiankäytöltään huomattavasti pienempi hanke. LEMENE-energiayhteisössä asiakaina on vain teollisuusyrityksiä ja kaupallista toimintaa harjoittavia yrityksiä. Kuluttaja-asiakkaita ei heillä ole. Näin suljetut verkot, myös sähköverkko, ovat mahdollisia toteuttaa. Suljetun sähköverkon toteuttamisen ehtona on kuitenkin verkkoliiketoiminnan luvan



saaminen Energiavirastolta. Keskusalueella toimijat ovat julkisia sekä yksityisiä ja rakennusten käyttötarkoitukset liike- ja asuinrakennuksia. Yksityiset toimijat ja rakennuttajat tekevät päätökset liittymisestä alueellisiin lämpö- ja kylmäverkostoihin.

Suomessa sähköverkkoliiketoimintaa ohjataan sähkömarkkinalaissa. Sähkömarkkinalain 4§ mukaisesti sähköverkkoliiketoiminnan harjoittamiseen tarvitaan Energiamarkkinaviraston lupa. Mutta sähköverkko, jolla hoidetaan vain kiinteistön tai sitä vastaavan kiinteistöryhmän sisäistä sähkötoimitusta, ei ole luvanvarainen. (Sähkömarkkinalaki 2019) Kiinteistöryhmän rakennusten tonttien tulee olla kiinni toisissaan. Energiaviraston antaman lausunnon mukaan tonttien välillä voi olla myös liikenneväylä, esimerkiksi tie tai rautatie (Energiavirasto 2015).

Kuntakeskuksessa energiayhteisön oma sähköverkko voidaan rakentaa kuntakonsernin hallinnoimien kiinteistöjen välille. Sähkön osalta kuluttaja-asiakkaalla, kuten taloyhtiöillä, on mahdollisuus liittyä vain paikallisen sähköverkkoyhtiön verkkoon. Lempäälässä sähköverkon omistaa ja hallinnoi Elenia Oy. Silloin, kun käytetään sähköverkkoyhtiön verkkoa sähkön siirtoon, sähkön hintaan lisätään siirtomaksut ja sähköverot. Koska siirtomaksut ja verot ovat yhteensä noin 2/3 sähkön kuluttajahinnasta, sähköverkkoyhtiön verkon kautta paikallisesti tuotettua sähköenergiaa ei taloudellisesti kannata siirtää tuotantokohteesta kulutuskohteeseen. Tästä syystä keskusalueella energiayhteisön sähköverkkoon voi liittyä vain kunnan tai kunnan yhtiöiden hallinnoimia rakennuksia ja alueita, joita ovat Lempäälä-talo, pysäköintilaitokset ja mahdollisesti myös läheiset katualueet, joilla sähköä kuluu valaistukseen. Energiayhteisön sähköverkon lisäksi näihin kohteisiin tulee sähköverkkoyhtiön pääliittymä. Sähkönsyöttö saadaan kahdennettua, kun verkko-yhtiön tuoman sähkön rinnalla on oman tuotannon sähkönsyöttö. Tämä vähentää sähkökatkoksista aiheutuvia haittoja sekä tarvetta varavirran syötölle.

Sekä LEMENE- että kuntakeskuksen korttelikohtaisessa hankkeessa toimitetaan asukkailla keskitetysti lämpöenergiaa, joka on perinteistä kaukolämpöä matalammalla lämpötilatasolla. Alustavasti on suunniteltu, että kuntakeskuksen korttelikohtaisen energiantuotannon lämpöasiakkaiksi tulisi myös alueen taloyhtiöitä ja muita yksityisiä toimijoita.

Kulutusprofiililtaan ympäristöt ovat erilaiset. Teollisuus- ja liikekiinteistöissä käytetään esimerkiksi paljon enemmän jäähdytysenergiaa kuin asuinkiinteistöissä. Asuinkiinteistöissä energian käyttöä on suhteessa enemmän virka-ajan ulkopuolella kuin liikekiinteistöissä. Teollisuuskiinteistöissä ja kaupan alan kiinteistöissä kulutusprofiilit riippuvat paljon toimijasta. Osa vaatii jatkuvaa ja suhteellisen tasaista energian saantia. Osa asukkaista taas tarvitsee energiaa työ- tai aukioloaikojen mukaisesti. Keskusalueella asukkailla ei ole yhtä paljon omaa energiantuotantoa eikä hukkalämpöjä hyödynnettäväksi kuin teollisuusalueella.

Rakennusten jäähdytystä varten laajennetaan kaukokylmäverkosto kuntakeskukseen. Kylmäteknikan osalta ratkaisut eroavat toisistaan, koska yritysalueelle ei ainakaan tässä

vaiheessa ole tulossa keskitettyä kaukokylmäverkostoa. Lempäälän kuntakeskuksessa pääosa kaukokylmästä tuotetaan vapaajäähdytyksellä järvivettä hyödyntäen. Kaukokylmän tuotantoon käytettävän järviveden lämpötila nousee kesällä ja tarvittavan jäähdytystehon tarve samalla kasvaa. Kesällä tarvitaan siksi lisäjäähdytystä, joka tuotetaan tällä hetkellä kompressoritekniikkaa hyväksi käyttäen. Tässä työssä selvitetään sähköntuotannosta ylijäävän lämmön mahdollista käyttöä jäähdytykseen.

Tässä työssä selvitetään Lempäälä-talon sähkö-, lämpö-, sulatus- ja kylmäenergian tarve tuntitasolla. Lisäksi tarkastellaan aurinkoenergian tuottoa tuntitasolla. Lempäälä-talon ja pysäköintilaitoksen mallinnetun sähkönkulutuksen ja aurinkopaneeleiden mallinnetun tuoton avulla mitoitetaan järjestelmän kaasumoottorit, joiden avulla saadaan tuotettavan lämmön määrä. Lempäälä-talon lämmöntarpeesta ylijäävän lämmön osalta kartoitetaan sen riittävyyttä läheisille taloyhtiöille ja käytettäväksi kaukokylmän tuotantoon.

### 3. YHTEISKUNNALLISET RAJOITTEET JA MAHDOLLISTAJAT

Ilmastonmuutoksen hidastaminen ja siihen sopeutuminen ovat suuria ja ajankohtaisia haasteita kaikille maailman valtioille. Tästä syystä työtä ilmastonmuutoksen vastustamiseksi ja haittojen minimoimiseksi tehdään monella eri tasolla.

Tässä luvussa käsitellään ilmastonmuutoksen hillintään liittyviä poliittisia strategioita ja sopimuksia sekä maailmanlaajuisesti, Euroopan unionin, Suomen että paikallisella tasolla. Lisäksi käsitellään ohjauskeinoja näihin tavoitteisiin pääsemiseksi. Taloudellisia ohjauskeinoja ovat esimerkiksi verot, muut päästöperusteiset maksut ja yhteiskunnan taloudelliset tuet. Muita yhteiskunnallisia ohjauskeinoja ovat erilaiset kehityshankkeet, lainsäädäntö ja muut käytänteet. Tässä työssä taloudellisia ja muita yhteiskunnan ohjauskeinoja tarkastellaan tämän hankkeen näkökulmasta.

#### 3.1 Poliittiset strategiat ja sopimukset

Ilmastonmuutos ja sen tuomat ongelmat on tiedostettu jo 1970-luvulta lähtien. Vuonna 1994 voimaantulleessa YK:n ilmastonmuutosta koskevassa puitesopimuksessa on tehty tärkeimmät kansainväliset linjaukset. YK:n ilmastonmuutoksen puitesopimukseen kuuluvat niin Kiiton pöytäkirja kuin Pariisin ilmastopöytäkirja. Pariisin ilmastopöytäkirjaan ovat sitoutuneet kaikki maat lukuun ottamatta Yhdysvaltoja ja Syyriaa. Ilmastonmuutosta koskevan puitesopimuksen mukaan osapuolten velvoitteita ovat ilmastonmuutosta hillitsevien ja ilmastonmuutokseen sopeuttavien ohjelmien tekeminen, kasvihuonepäästöjen määrän selvittäminen, hiilivarastojen ja hiilinielujen suojeleminen. YK:n ilmastopöytäkirjassa on myös todettu teollisuusmaiden erityinen velvollisuus johtaa ilmastonmuutosta hillitseviä toimia sekä avustaa kehitysmaita ilmastonmuutoksen vastaisessa työssä. (Ympäristöministeriö 2018)

Yhteiskunnallisesti haluttuja tavoitteita voidaan edistää niin pakottavalla lainsäädännöllä, ohjaavilla säädöksillä kuin taloudellisilla keinoilla, tuilla ja verotuksella. Euroopan unioni on tehnyt omat poliittiset linjaukset kansainvälisten ilmastopöytäkirjojen ja omien tavoitteidensa mukaisesti. Suomi on tehnyt oman lainsäädäntönsä Euroopan unionin linjausten sekä omien tavoitteiden mukaisesti.

##### 3.1.1 Euroopan unionin tavoitteet ja toimet

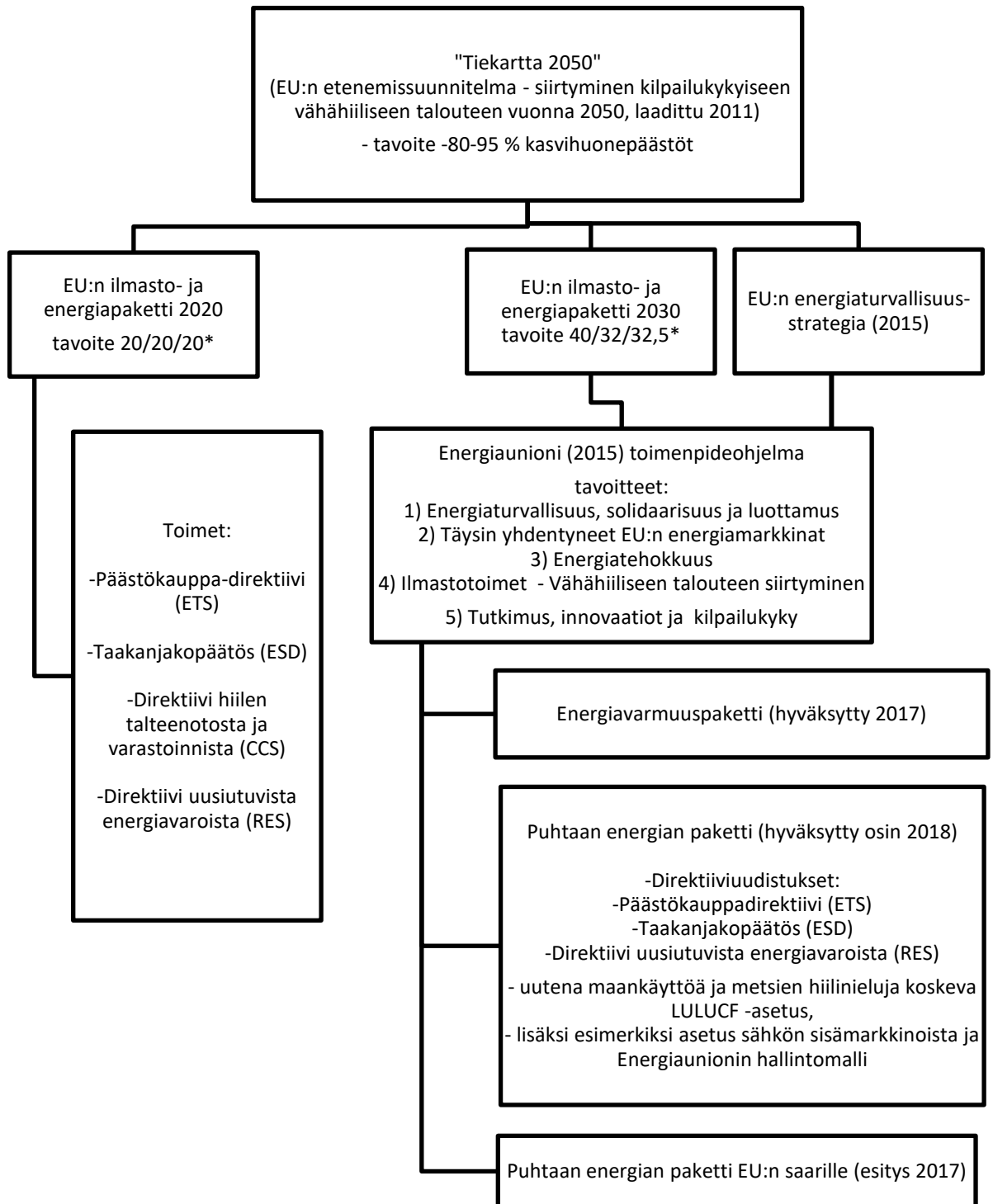
Euroopan unionin pitkän tähtäimen tavoite on vähentää vuoteen 2050 mennessä kasvihuonekaasupäästöjä 80-95 % verrattuna vuoden 1990 tasoon. Komissio on laatinut ete-

nemissuunnitelman, jonka virallinen nimi on ”Siirtyminen kilpailukykyiseen vähähiiliseen talouteen vuonna 2050”. Tämä etenemissuunnitelma tunnetaan yleisesti ”tiekartta 2050” -nimityksellä. Välitavoitteet kasvihuonepäästöjen vähentämiselle vuodelle 2020 on 20 % ja vuodelle 2030 40 %.

Tiekartta 2050 mukaisesti sähköllä tulee olemaan keskeinen rooli vähähiilisessä taloudessa. Myös kaukolämpöjärjestelmät nähdään hyvänä ratkaisuna. Kasvihuonekaasujen vähentäminen uusiutuviin energialähteisiin siirtymällä ja energiatehokkuutta kasvattamalla vähentää myös polttoainekustannuksia sekä riippuvuutta tuontienergiasta. Tiekartan teon aikaan 2011 Euroopan unionissa käytetystä energiasta 53 % tuotiin Euroopan unionin ulkopuolelta. Päästöjen vähentämisellä on myös muita suotuisia vaikutuksia. Päästöjen vähennys parantaa ilman laatua ja sitä kautta kansanterveyttä. Tiekartassa on arvioitu, että ilman epäpuhtaudet voivat vähentyä yli 65 % vuoteen 2030 verrattuna vuoteen 2005. Liikenteen muutoksella on tärkeä osa ilman epäpuhtauksien vähenemisessä. Tiekartan toimet edellyttävät 10 vuoden aikana 50 miljardin euron lisäinvestointeja kehittämiseen, tutkimukseen ja pilotointiin. Lisäksi tarvitaan merkittäviä pääomainvestointeja. Toisaalta teknologisen kehityksen eturintamassa oleminen tuo myös osaamista ja työpaikkoja, mitkä parantavat taloutta. Tiekartan mukaisesti on tärkeää tukea siirtymävaihetta osaamisen ja työllisyyden ohjelmilla. (Euroopan komissio 2011)

Tiekartan tavoitteiden saavuttamiseksi on luotu EU:n ilmasto- ja energiapaketti 2020, jossa on määritelty tavoitteeksi 20 % vähennys kasvihuonepäästöistä, 20 % lisäys uusiutuvan energian käytössä sekä 20 % parantaminen energiatehokkuudessa vuoteen 2020 mennessä. Vertailuvuotena näissä tavoitteissa on vuosi 1990. Näiden tavoitteiden saavuttamiseksi on teollisuuden ja energiantuotannon alalle luotu päästökauppajärjestelmä, jota ohjataan päästökauppadirektiivillä (ETS). Päästökaupan ulkopuoliselle sektorille, johon kuuluvat esimerkiksi liikenne, maatalous ja rakennusten energiankäyttö, keinot tavoitteisiin pääsemiseksi on kirjattuna taakanjakopäätökseen (ESD). Uusiutuvien energioiden käytön tehostamisesta on julkaistu direktiivi uusiutuvista energiavaroista (RES). Lisäksi tähän pakettiin kuuluu direktiivi hiilen talteenotosta ja varastoinnista (CCS).

Euroopan unionin vuoden 2030 tavoitteena kasvihuonepäästöille on 40 % vähennys. Energiatehokkuuden parantamiselle alkuperäinen tavoite oli 27 %. Tavoitetta nostettiin 32,5 %:iin marraskuussa 2018 Euroopan parlamentin hyväksyessä uudet direktiivit. Uusiutuvien energioiden osuuden tavoitetta on asteittain nostettu alkuperäisten tavoitteiden 27 %:ista vuoden 2018 uusiutuvan energian direktiivin tarkistuksen yhteydessä 32 %:iin. Tavoitteita vuodelle 2030 tullaan vielä tarkistamaan vuonna 2023.



\* tavoitteet: kasvihuonekaasujen vähentäminen / uusiutuvan energian käytön lisääminen / energiatehokkuuden parantuminen % verrattuna vuoteen 1990

**Kuva 4.** Euroopan unionin energiastrategia ja tärkeimmät päästövähennystä tukevat päätökset ja direktiivit.

Vuonna 2015 perustettiin Energiaunioni, jonka tehtävänä on edistää sekä Euroopan unionin ilmasto- ja energiatarpeita että energiaturvallisuusstrategian toteutusta (Euroopan komissio 2015). Energiaunionin alaisuudessa on valmisteltu puhtaan energian paketti, mikä pitää sisällään vuoden 2020 tavoitteiden toimeenpanon yhteydessä luotujen päästökauppa- ja uusiutuvien energiavarojen direktiivien sekä taakanjakopäätöksen uudistaminen. Lisäksi puhtaan energian paketti piti sisällään uuden maankäyttöä, maankäytön muutosta ja metsien hiilinielua koskevan direktiivin (LULUCF), sähkön sisämarkkinoita koskevan asetuksen sekä hallintomallin energiaunionille. Energiatarpeiden saavuttaminen vaatii vuositasolla Euroopassa 379 miljardin euron investoinnit. Toisaalta jo vuoteen 2020 mennessä arvioidaan vihreän energiatalouden tuovan 1,5 miljoonaa uutta työpaikkaa Euroopassa. (Euroopan komissio 2018a) Euroopan unionin energiastrategia ja tärkeimmät toimet on esitetty kuvassa 4.

### 3.1.2 Suomen tavoitteet ja toimet

Vuonna 2014 valmistui parlamentaarisen energia- ja ilmastokomitean mietintönä pitkän ajan kansallinen energia- ja ilmastotategia, Energia- ja ilmastotiekartta 2050. Sen mukaisesti Suomi pyrkii Euroopan unionin vuoden 2050 tavoitteiden, 80 – 95 % vähennys kasvihuonepäästöissä, lisäksi pitkällä tähtäimellä hiilineutraaliksi yhteiskunnaksi. Suomen omassa strategiassa korostuu bioenergian käyttö sekä uuden teknologian kehittäminen ja uuden teknologian (cleantech) vientimahdollisuudet. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2014)

Suomen energia- ja ilmastostrategian vuoteen 2030 on annettu valtioneuvoston selontekona eduskunnalle marraskuussa 2016. Kansallinen energia- ja ilmastostrategia toteuttaa sekä Euroopan unionin, Suomen energia- ja ilmastotiekartan 2050 että Sipilän hallituksen tavoitteita. Tavoitteita on kasvihuonepäästöjen vähentämisen lisäksi huoltovarmuuden ylläpidossa sekä energianhankinnan omavaraisuusasteen kasvattamisessa. Tavoitteeksi vuoteen 2030 mennessä on nostaa uusiutuvan energian osuus 50 %:iin loppukulutuksesta ja energian hankinnan omavaraisuusaste on 55 %:iin. Suomessa omavaraisuusasteeseen ei lasketa ydinvoiman osuutta. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017)

Suomella tavoitteena on luopua kokonaan kivihiilen energiankäytöstä ja puolittaa tuontiöljyn energiakäyttö vuoteen 2030 mennessä. Sähkön ja lämmön yhteistuotannossa tämä tarkoittaa metsähakkeen ja erilaisten yhteiskunnan, teollisuuden ja maatalouden sivuvirtojen käyttöä energialähteenä. Tavoitetta kannustetaan energiaverotuksen keinoin. Sähkön erillistuotannossa näitä tavoitteita edistetään tuotantotuella. Sähkön ja lämmön yhteistuotanto ja sähkön erillistuotanto suurissa tuotantoyksiköissä kuuluvat päästökaupan piiriin. Lisäkannustetta tarvitaan, koska katsotaan, että pelkkä päästökauppa ei ohjaa kyllin tehokkaasti uusiutuvien energialähteiden käyttöön. Tuontiöljyn tarvetta vähennetään myös liikenteen polttoaineen biopolttoaineen sekoitusvelvollisuuden nostolla 30 %:iin. Biopolttoaineen sekoitusvelvollisuus tulee myös 10 % osuudella kevytöljyyn, jota käy-

tään rakennusten lämmitykseen tai työkoneiden polttoaineena. Lisäksi tavoitteena on nostaa liikenteen sähköautojen määrä 250 000 ja kaasukäyttöisen autojen määrä 50 000 autoon vuoteen 2030 mennessä. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017)

Biokaasun käyttöä ja tuotantoa edistetään tukemalla kaasukäyttöisten autojen ja työkoneiden hankintaa sekä tukemalla biokaasulaitosinvestointeja. Lisäksi strategian mukaisesti helpotetaan lupamenettelyä sekä selkeytetään säädöksiä biokaasutuotannon osalta. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017)

Merkittävässä roolissa kansallista ilmasto- ja energias strategiaa ovat myös älykkäiden sähköverkkojen ja -markkinoiden kehittäminen sekä alueellisesti että eurooppalaisella tasolla. Verkkoyhteyksiä parannetaan esimerkiksi uudella 800 MWh siirtoyhteydellä Ruotsiin. Tehoreserviä on tarkoitus kasvattaa nykyisestä 299 MW:sta 600 MW:iin ja samalla parantaa tehoreservin joustavuutta. Tavoitteena on kaikkiaan kulutuksen ja tuotannon joustavuuden parantaminen sekä aktiivisen osallistumisen kehittäminen älykkäillä ratkaisuilla sekä Suomen edelläkävijyasema älykkäissä verkoissa. Kysyntäjousto määritellään strategiassa keskeiseksi osaksi energiatehokkuutta. Kysyntäjoustolla, josta käytetään myös nimitystä kulutusjousto, tarkoitetaan sähkönkäytön siirtämistä korkean kulutuksen ajalta edullisempaan ajankohtaan tai käytön hetkellistä muuttamista kulutuksen ja tuotannon välisen tehotasapainon hallitsemiseksi (Fingrid 2018). Strategian mukaan myös sähkön kuluttajahinnan tulisi paremmin heijastaa sähkön tukkuhintaa. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017)

Älykkäiden sähköverkkojen ja -markkinoiden kehittämiseksi työ- ja elinkeinoministeriö asetti älyverkkotyöryhmän, jonka loppuraportti valmistui lokakuussa 2018. Loppuraportissa on kirjattuna 13 keskeistä ehdotusta, joilla edesautetaan uusiutuvan energian myötä tulevaa tehonvaihtelun hallintaa sähköverkoissa. Näiden ehdotusten tavoitteena on esimerkiksi mahdollistaa erilaisten paikallisen tuotannon energiayhteisöiden toiminta, jolloin pienverkkojen rakentaminen helpottuisi lainsäädäntöä muuttamalla. Älykkään sähköverkon edellytyksenä on uuden sukupolven sähkömittareiden lisäksi taloudellinen ohjaus kuluttajille. Sähkönsiirtomaksun tehokomponentin avulla kuluttaja voisi itse vaikuttaa sähkölaskuunsa. Uutena ehdotuksena on sähkömarkkinoille tulevat joustopalveluntarjoajat, itsenäiset aggregaattorit, jotka voivat tarjota kuluttajille palveluita riippumatta sähkönmyyjästä. Sähkövarastojen omistamista ja käyttöä ehdotetaan kilpailulliseksi liiketoiminnaksi ja lisäksi ehdotetaan, että sähköveroa ei enää tarvitsisi maksaa varastoitavasta sähköstä. Myös rakennussäätelyä tulisi älyverkkotyöryhmän loppuraportin mukaan muuttaa niin, että se tukisi sähkönsiirtomaksun huomioon otamisen myös sähköautojen latauksen kustannustehokkaasti. (Pahkala et al. 2018)

Päästökaupan ulkopuolisella taakanjakosektorilla Euroopan unionin energiatehokkuusvelvoitteiden toimenpiteet toteutetaan suurelta osin energiatehokkuussopimusten avulla. Energiatehokkuussopimukset ovat vapaaehtoisuuteen perustuva tie toteuttaa velvoitteet.

Vapaaehtoisuus mahdollistaa osallistuvien yritysten ja yhteisöjen toteuttaa energiatehokkuustoimet parhaaksi näkemällään tavalla, eikä näin tarvita valtiovallan puolelta uutta pakottavaa sääntelyä. Energiatehokkuussopimuksia on tehty teollisuudelle, energia- ja palvelualalle, kiinteistöalalle, kunta-alalle sekä öljylämmityskiinteistöihin. Energiatehokkuussopimuskaudella 2008-2016 mukana oli 667 yritystä, 132 kuntaa ja kuntayhtymää, joiden yhteenlaskettu energiansäästö kaudella oli 15,9 TWh. (Motiva Oy 2018)

Hallitus on lisäksi hyväksynyt vuonna 2017 keskipitkän aikavälin ilmastosuunnitelman, joka kantaa nimeä ”Kohti ilmastoviisaampaa arkea”. Tavoitevuosi tässä suunnitelmassa on 2030. Suunnitelmassa esitetään päästökaupan ulkopuolisen sektorin toimet kasvihuonepäästöjen vähentämiseen. Suunnitelma perustuu ilmastolakiin.

Suomessa toimii Suomen ympäristökeskuksen alaisuudessa HINKU-foorumi, jonka muodostavat kunnat, jotka tavoittelevat edelläkävijyyttä ilmastomuutoksen hillinnässä. Jokainen HINKU-foorumiin liittynyt kunta tavoittelee vähintään 80 % kasvihuonepäästövähennystä vuoteen 2030 mennessä verrattuna 2007 tasoon. HINKU-foorumiin liittyneet kunnat saavat verkoston, josta saa tukea erillishankkeisiin, tiedonvaihtoa, viestintäyhteistyötä ja päästölaskentapalvelua. Myös HINKU-kuntien yritykset saavat näkyvyyttä foorumin kautta. HINKU-kuntia on 42 kappaletta ja niissä on asukkaita yhteensä noin 750 000. (Suomen ympäristökeskus 2018)

### **3.1.3 Maakunnalliset ja seutukunnalliset tavoitteet**

Tampereen kaupunkiseudun kuntayhtymä organisoii seutuyhteistyötä. Yhtenä osana seutuyhteistyössä on yhteiset ilmastotavoitteet, jotka on kirjattu vuonna 2010 hyväksyttyyn seudun ilmastostrategiaan. Ilmastotavoitteita on päivitetty vuonna 2018, jolloin tavoitteeksi on asetettu hiilineutraali kaupunkiseutu 2030. Tavoitteesta 80 % on tarkoitus saavuttaa kasvihuonepäästöjen vähentämisellä ja loput 20 % sidotaan hiilinieluihin ja kompensoidaan. (Tampereen kaupunkiseutu 2018)

Tampereen kaupunkiseudun kunnat ovat päättäneet liittyä yhteisesti Hinku-foorumiin. Hinku-foorumiin voivat liittyä kunnat, jotka ovat sitoutuneet 80 % kasvihuonepäästöjen vähentämiseen verrattuna vuoteen 2007. Lisäksi foorumiin voi liittyä myös yrityksiä ja asiantuntijoita. Lempäälän kunta liittyi ensimmäisenä kaupunkiseudun kuntana Hinkuun marraskuussa 2018.

Pirkanmaan ilmasto- ja energias strategia on julkaistu toukokuussa 2014. Maakunnallinen ilmasto- ja energias strategia kattaa laajemman maantieteellisen alueen kuin Tampereen seudun ilmastostrategia. Myös maakunnan strategian tavoitetta on päivitetty ja tavoitteet vastaavat Tampereen kaupunkiseudun tavoitteita. (Pirkanmaan liitto 2019)



### 3.1.4 Kunnan omat strategiat ja sopimukset

Kunnan pitkän aikavälin tavoitteet on kirjattu kuntastrategiaan. Lempäälän kunnan kuntastrategia vuosille 2018-2025 hyväksyttiin joulukuussa 2017. Strategian kolme painopistettä on nimetty ”Yhdessä”, ”Elämykset” ja ”Edelläkävijäisyys”. Edelläkävijäisyysteeman alla yhtenä tavoitteena on olla energiantuotannon ja kierrätyksen edelläkävijä. Tavoitteena on lisäksi väestönkasvu kuntakeskuksen ja joukkoliikennereittien varsien kehittämisellä sekä kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen 80 % vuoden 2007 tasosta. (Lempäälän kunta 2017)

Kunta on mukana kuntien energiatehokkuussopimuksessa sekä sopimustoiminnan ensimmäisellä, vuodet 2009-2016 kattavalla ajanjaksolla, että uudella 2017-2025 vuodet kattavalla sopimusjaksolla. Lisäksi kunta on solminut yhdessä seudun muiden kuntien kanssa maankäyttöä ja liikennettä ohjaavan MAL-sopimuksen valtion kanssa.

Aikaisemmin esitelty LEMENE-hanke tukee sekä energiantuotannon edelläkävijäisyys -tavoitetta sekä kasvihuonekaasujen vähentämistä. Myös kuntakeskuksen korttelikohtaisen energiantuotannon hanke on toteutuessaan kuntastrategian mukainen hanke.

## 3.2 Yhteiskunnan taloudellinen ohjaus

Yhteiskunta voi ohjata toimintaa haluttuun suuntaan joko pakottamalla tai kannustamalla. Pakottaminen tarkoittaa esimerkiksi lainsäädännön tekoa. Kannustamista voidaan tehdä taloudellisilla keinoilla, päästökaupalla, verotuksella ja tuilla tai valistuksen ja koulutuksen avulla. Taloudellisista keinoista päästökauppa on Euroopan laajuista, veropolitiikka on kansallista, erilaisia tukia myönnetään niin Euroopan unionin taholta että kansallisesti.

### 3.2.1 Verot

Valtio kerää sähköstä ja polttoaineista kolmea eri valmisteveroa, jotka ovat energiasisältövero, hiilidioksidivero ja energiavero. Myös lämmityspolttoaineiden hiilidioksidiverossa huomioidaan poltossa syntyvien päästöjen lisäksi muut elinkaaren aikaiset päästöt.

Periaatteena energiaverotuksessa on, että sähköntuotannossa polttoaine on verotonta ja verotetaan sähköenergiaa, kun taas lämpöenergian osalta verotetaan polttoainetta. Yhdistetyllä sähkön ja lämmön tuotannolla verolainsäädännössä tarkoitetaan voimalaitosta, joka samalla verokaudella tuottaa sekä sähköä että lämpöä. Yhdistetyssä sähkön ja lämmöntuotannossa lämmön tuotantoon käytetyn polttoaineen energiasisältö lasketaan kertomalla kulutukseen lähtevä lämpö kertoimella 0,9. Yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa polttoaineen energiasisältövero ei peritä. Uutena seikkana lainsäädäntöön vuoden 2019 alusta tulivat verovapaat sähkövarastot. Tämä mahdollistaa verovapaaksi rekisteröityjen sähkövarastojen käytön tehovaihtelujen tasaamiseen ilman kaksinkertaista verotusta. (Laki sähkön ja eräiden polttoaineiden valmisteverosta 1260/1996 2019)

Pientuotannossa oman tuotannon sähköverovelvollisuuden rajana on 800 MWh tuotto vuodessa. Omasta sähköntuotannosta on ilmoitusvelvollinen verohallinnolle, jos sähköntuotannon teho ylittää 100 kVA. Verovelvolliseksi rekisteröityminen ja verovelvollisuus eivät riipu tuotantomuodosta eikä polttoaineesta. Sähkö, joka kulutetaan sähkön tai yhdistetyn sähkön ja lämmöntuotantoon voimalaitoksessa ovat valmisteverotonta ja huoltovarmuusmaksutonta. Samoin sähköverkkoon luovutettu sähkö on verotonta. Verkkoyhtiö taas on verovelvollinen sähköstä, jota se välittää.

### 3.2.2 Päästökauppa

Päästökauppa on Euroopan unionin sisäinen järjestelmä, jonka juuret ovat Kioton ilmastopöytäkirjassa. Päästökauppa Euroopassa alkoi vuonna 2005 ja nykyinen eli kolmas EU:n päästökauppa-kausi kattaa vuodet 2013-2020. Tavoitteet kasvihuonepäästöjen vähennykselle päästökauppa-kausi on 21 % vuoteen 2020 ja 43 % vuoteen 2030 mennessä verrattuna vuoteen 2005. Sopimuksessa rajoitettavia kaasuhuonepäästöjä hiilidioksidin ( $\text{CO}_2$ ) lisäksi dityppioksidin ( $\text{N}_2\text{O}$ ) ja perfluorihiilivedyt (PFCs). Päästökauppa-kausiin kuuluvat energiantuotannon lisäksi energiaintensiivistä teollisuutta sekä ilmailua. (Euroopan komissio 2018b)

Suomessa päästökauppaa säädetään päästökauppalaki. Päästökauppalaki koskee Suomessa noin 600 laitosta. Päästökaupan piirissä oleva laitos tarvitsee päästöluvan. Lisäksi toiminnanharjoittajan on tarkkailtava päästöjä, tehtävä päästöistä selvitys vuosittain sekä haettava ja palautettava päästöoikeudet. Lain mukaan päästökaupan piiriin kuuluvat kaukolämpölaitokset, joiden nimellinen kokonaislämpöteho on vähintään 20 MW. Jos samaan kaukolämpöverkkoon yli 20 MW voimalaitoksen kanssa on liitetty pienempiä polttolaitoksia, myös nämä pienemmät polttolaitokset kuuluvat päästökaupan piiriin. (Päästökauppalaki 2011)

Lempäälän Lämmön suurin lämpölaite on keskustan lämpölaite. Laitoksen koko on 19 MW ja siten jää alle 20 MW:n, joten Lempäälän Lämpö ei kuulu päästökaupan piiriin. On huomioitava, että energiayhteisön energiantuotanto tuo keskustan lämpölaitokselle tehonlisäystä. Rajana lisäykselle on se, että kokonaisteho pysyy alle 20 MW. Kuten jo edellä on mainittu, 20 MW rajan rikkominen toisi mukanaan myös pienempien samaan Lempäälän Lämmön kaukolämpöverkkoon liittyvien laitosten siirtymisen päästökaupan piiriin.

### 3.2.3 Tuet ja hankkeet

Euroopan unioni tukee sekä tutkimus- että investointihankkeita sekä suoraan omien ohjelmien kautta että jakamalla rahoitusta kansallisten ohjelmien kautta. 20 % tuista tulee suoraan EU:n ohjelmien kautta. Tutkimusta ja innovaatiota puhtaasti energian saralla tuetaan Horizon 2020 -tutkimusohjelman kautta. Puhtaasti energiaan kuuluvat uusiutuvien energioiden, älykkäiden energiaverkostojen, energian varastoinnin, energiatehokkuuden,

hiilinielujen ja -varastojen sekä älykkäiden kaupunkiympäristöjen (Smart Cities) kehittäminen. Tutkimushankkeissa korostuu erityisesti kaikilla aloilla tieto- ja viestintäteknologian (engl. information and communication technology, ICT) liittäminen osaksi puhtaan energian tekniikoita. Rahoitusta tutkimus- ja investointihankkeille on saatavissa näiden ohjelmien kautta sekä esimerkiksi Euroopan investointirahastosta, rakenne- ja koheesiorahastoista. Suomelle myönnetään EU-tukea Euroopan aluekehitysrahastosta (EAKR) ja Euroopan sosiaalirahastosta (ESR). (Työ- ja elinkeinoministeriö 2019) Rakennerahastojen tuen Pirkanmaalla myöntää Pirkanmaan liitto. Hakuja on useita ja eri hakukerroilla on erilaisia painopistealueita hankkeille, joita tuetaan. (Pirkanmaan liitto 2018)

Suomessa kansallisesti tuetaan energia- ja ilmastostrategian pyrkimyksiä erilaisilla tuilla. Energiatukia myönnetään lähinnä energiatehokkuussopimuksiin liittyneille yrityksille ja julkisyhteisöille energiansäästöön ja uusiutuvan energian lisäämiseen tähtääviin katselmointi- ja investointihankkeisiin. Energiansäästöön tähtäävät investoinnit voivat olla kaupallisella vakiintuneilla tekniikoilla toteutettuja. Lisäksi uusiutuvan energian ja uuden energiateknologian tukea myönnetään uuteen teknologiaan, joka on kehitteillä ja vasta markkinoille tulossa. Vuonna 2018 energiatukeen on budjetoitu 35 miljoonaa euroa (M€) ja uuden teknologian tukeen 40 M€. (Valtiovarainministeriö 2018)

## 4. ENERGIANKULUTUS RAKENNUKSISSA

Kiinteistöissä tarvitaan energiaa valaistukseen, sähkölaitteiden käyttöä varten, lämmitykseen ja yllämmön poistoon. Tarvittava energiamäärä vaihtelee päivän aikana esimerkiksi kuormituksen ja ulkolämpötilan mukaan. Osa sähkölaitteista kuluttaa energiaa vuorokauden ympäri, kuten erilaiset talotekniikan pumput ja puhaltimet, laitteiden herätevirrat ja kylmälaitteet. Pimeänä aikana ulkovalaistus kuluttaa sähköenergiaa. Suurimmalta osalta sähköenergiaa käytetään kuitenkin kiinteistöjen käyttöaikoina. Myös talotekniikan puhaltimet ja pumput kuluttavat sähköä enemmän kiinteistön käyttöaikana, kun esimerkiksi ilmanvaihto ja jäähdytys ovat suuremmalla teholla.

Rakennuksissa lämmitystä tarvitaan rakenteiden lämpöhäviöiden kompensoimiseksi sekä ilmanvaihdon tuloilman ja korvausilman lämmitykseen. Rakennuksissa käytettävästä lämmitysenergiasta osa kuluu myös käyttöveden lämmitykseen. Lisäksi lämmitysenergiaa voidaan tarvita katu- ja piha-alueiden sulanapitoon. Sulanapidon tarkoitus on pitää alueet lumettomina ja estää liukkauden syntymistä.

Yllämmönpoistoa eli jäähdytystä tarvitaan rakennuksissa auringosta, ihmisistä ja laitteista tulevan ylimääräisen lämpökuorman poistoon. Jäähdytystarpeeseen voidaan vaikuttaa paljon jo rakennuksen suunnitteluvaiheessa tehtävillä valinnoilla. Siksi nykyisin voimassa olevat rakentamismääräykset ohjaavat rakennusten dynaamisten, laskentaohjelmien avulla tehtävien, mallinnusten tekemiseen. Mallinnuksien avulla etukäteen selvitetään valittujen ratkaisuiden vaikutus kesäajan sisäilmaolosuhteisiin ja jäähdytystarpeeseen. Näin mallinnuksen avulla voidaan optimoida esimerkiksi rakennukseen oikeanlaiset aukotukset, ikkunoiden laatu sekä varjostavat rakenteet ja kaihtimet. Asuinkerrostalot voidaan hyvällä suunnittelulla saada sellaisiksi, että yllämpöä ei haittaavassa määrin ole. Toimistorakennuksissa on enemmän ihmisistä ja laitteista tulevaa lämpökuormaa. Usein toimistorakennuksissa myös tavoitellaan määräyksiä parempaa S1- tai S2-sisäilmastoluokkaa. Tästä syystä toimistorakennuksissa yleensä tarvitaan jäähdytyslaitteistot. Liikerakennuksissa jäähdytyksen tarve riippuu toiminnan laadusta. Yleisimmin myös liikerrakennuksissa jäähdytys tarvitaan. Erikseen on vielä esimerkiksi ravintolat ja niiden keittiöt, missä tarvitaan energiaa tilojen jäähdytyksen lisäksi ruuan säilytykseen käytettävälle kylmälaitteille.

### 4.1 Lämpöenergian tarpeen laskeminen rakennuksessa

Kuten jo aiemmin mainittiin, lämpöenergiaa tarvitaan kiinteistössä lämpöhäviöiden kompensointiin, ilmanvaihdon kautta tulevan ilman lämmittämiseen ja käyttöveden lämmittämiseen. Rakennuksen vaipan yli menevien lämpöhäviöiden määrään vaikuttavat vaipan

rakennusosien ominaisuudet, rakennuksen tiiveys sekä ulkoilman lämpötila, jonkin verran myös muut sääilmiöt kuten tuuli ja sade sekä lisäksi esimerkiksi ovien ja ikkunoiden aukaisemiset. Ilmanvaihdon ja käyttöveden lämmöntarpeeseen vaikuttaa rakennuksen käyttöajat, mutta sekä ilmanvaihtoon että käyttöveteen tarvitaan lämpöä myös käyttöajan ulkopuolella. Ilmanvaihto ei ole koskaan kokonaan pois päältä. Ilmanvaihdon poistoilmasta otetaan lämpöä talteen lämmöntalteenoton avulla 30-85 % riippuen lämmöntalteenoton tyypistä. Lämpimän käyttöveden kiertojohdossa virtaa koko ajan lämmin vesi, jotta myös lämmönjakohuoneesta kaukana olevat käyttöpisteet saisivat lämmintä vettä ilman kohtuutonta viivettä. Vaikka vettä ei kuluteta, kiertojohdossa on aina lämpöhäviötä.

Toisaalta lämmitysenergian tarvetta vähentävät erilaiset lämpökuormat. Tällaisia ovat henkilöistä, valaistuksesta ja muista sähkölaitteista, auringosta ikkunoiden kautta tulevat lämpökuormat. Myös käyttöveden kiertojohdosta ja varastoinnista tulee lämpökuormaa rakennukseen. Osa näistä lämpökuormista voidaan hyödyntää rakennuksen lämmitykseen. Varsinkin kesäaikaan lämpökuormat aiheuttavat yllilämpöä ja sitä kautta jäähdytyksen tarvetta.

Lämmitystehon ja lämpöenergian tarpeen laskennan ohjeistus löytyy Ympäristöministeriön julkaisemassa rakentamismääräysten Energiatehokkuus, Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystarpeen laskenta -ohjeesta. Lämmitysenergian ja -tehon tarve lasketaan määräysten täyttymisen osoittavissa sekä energiatodistuksia varten tehdyissä laskelmissa rakennuksen käyttötarkoituksen mukaan määräytyvien standardilähtöarvojen avulla. Standardikäyttöä kuvaavia lähtöarvoja käyttämällä pystytään vertailemaan eri rakennuksia ilman, että erilaiset käyttötavat ja käyttöasteet vaikuttaisivat vertailuun. Rakennuksen suunnittelua, toteutusta ja käyttöä varten kannattaa kuitenkin tehdä tarkemmat, juuri kyseistä rakennusta palvelevat, energialaskelmat käyttäen todellisia rakennuksen lähtöarvoja. Määräystenmukaisuuden osoittava energialaskenta lämmityksen osalta voidaan tehdä kuukausitasoisella tarkastelulla silloin, kun rakennuksessa ei ole jäähdytystä. Jäähdytetyn rakennuksen lämpöenergian kulutus ja lämpöenergian tarve lasketaan aina dynaamisella laskentaohjelmalla. Laskenta tehdään enintään tunnin aika-askeleella. (Suomen rakentamismääräyskokoelma 2018) Dynaaminen laskenta huomioi myös rakenteiden lämmönvarausominaisuuden. Yleisesti käytettyjä dynaamisia energialaskentaohjelmistoja ovat esimerkiksi IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) ja Riuska. IDA ICE:ssä on mahdollisuus ottaa myös tuulesta ja lämpötiloista johtuvien ilmapvirtausten vaikutus huomioon. Ohjelmissa käytetään energialaskentaa varten luotua säädataa, joka edustaa keskimääräistä säätilaa laskettavalla paikkakunnalla. Esimerkiksi IDA ICE käyttää säädatana ASHRAE:n (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) ilmastokeskuksen tuottamaa tuntitasoista IWEC2-säädataa (International Weather for Energy Calculation, v 2.0). IWEC2-säädata on saatavilla 3 012 paikkakunnalle maailmanlaajuisesti pois lukien Yhdysvallat ja Kanada, joiden säätiedoille on omat erilliset laskentadatansa. Myös kuukausitasoinen laskenta määräystenmukaisuuden

osoittamiseksi tehdään yleensä valmiita ohjelmia hyödyntäen. Esimerkiksi laskentapalvelut.fi -ohjelmisto on saatavissa käyttöön myös maksutta.

Alla tarkemmin tarkastellaan lämpöhäviölaskennan teoriaa. Käytännössä laskeminen tehdään simulointiohjelmilla.

Johtumislämpöhäviö  $Q_{joht}$  rakennusvaipan yli lasketaan kaavalla (Suomen rakentamismääräyskokoelma 2018)

$$Q_{joht} = Q_{ulkoseinä} + Q_{yläpohja} + Q_{alapohja} + Q_{ikkuna} + Q_{ovi} + Q_{muu} + Q_{kylmäsilta} \quad (1)$$

Yllä olevassa kaavassa johtumislämpöhäviöt ulkoilmaan rajoittuvan rakennusosan yli on merkitty  $Q_{rakosa}$ . Ulkoilmaan rajoittuvia rakenneosia ovat ulkoseinä, yläpohja, alapohja, ikkuna ja ovi. Johtumislämpöhäviöllä  $Q_{muu}$  ilmaistaan lämpöhäviötä tilaan, jonka lämpötila poikkeaa ulkoilman lämpötilasta. Kylmäsiltojen johtumislämpöhäviöstä käytetään merkintää  $Q_{kylmäsilta}$ . Johtumislämpöhäviön yksikkö on joule (J).

Ulkoilmaan rajoittuvien rakennusosien lämpöhäviöt lasketaan kaavalla (Suomen rakentamismääräyskokoelma 2018)

$$Q_{rakosa} = \sum U_i A_i (T_s - T_u) \Delta t, \quad (2)$$

jossa  $U_i$  on yksittäisen rakenteen lämmönläpäisykerroin ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ),  $A_i$  on rakenteen  $i$  pinta-ala,  $T_s$  on rakennuksen sisälämpötila,  $T_u$  on ulkolämpötila ja  $\Delta t$  on ajanjakson pituus.

Maanvastaisen alapohjan lämpöhäviön laskennassa käytetään ulkolämpötilan sijasta maan lämpötilaa. Alapohjan alla olevan maan vuotuinen keskilämpötila  $T_{maa, vuosi}$  saadaan laskettua kaavalla (Suomen rakentamismääräyskokoelma 2018)

$$T_{maa, vuosi} = T_{u, vuosi} + \Delta T_{maa, vuosi}, \quad (3)$$

jossa  $T_{u, vuosi}$  on ulkoilman vuosikeskiarvo ja  $\Delta T_{maa, vuosi}$  on alapohjan alapuolisen maan lämpötilan ja ulkolämpötilan vuosikeskiarvon ero. Tälle lämpötilaerolle käytetään arvoa  $5^\circ\text{C}$ .

Maan ja ulkoilman välinen kuukausittainen lämpötilaero  $T_{maa, kk}$  lasketaan kaavalla (Suomen rakentamismääräyskokoelma 2018)

$$T_{maa, kk} = T_{maa, vuosi} + \Delta T_{maa, kk} \quad (4)$$

Alapohjan alapuolisen maan lämpötilan ja ulkolämpötilan kuukausikeskiarvon ero  $\Delta T_{maa, kk}$  saadaan taulukosta 1.

**Taulukko 1.** Alapohjan alapuolisen maan lämpötilan ja ulkolämpötilan kuukausikeskiarvojen ero (Rakentamismääräyskokoelma 2018)

Kuukausi	$\Delta T_{\text{maa, kk, } ^\circ\text{C}}$
Tammikuu	0
Helmikuu	-1
Maaliskuu	-2
Huhtikuu	-3
Toukokuu	-3
Kesäkuu	-2
Heinäkuu	0
Elokuu	1
Syyskuu	2
Lokakuu	3
Marraskuu	3
Joulukuu	2

Rakennusosien välillä on liitoksia, esimerkiksi oven tai ikkunan liitos ulkoseinään, yläpohjan ja ulkoseinän väliset liitokset sekä nurkkaliitokset. Rakennusosien väliset liitokset aiheuttavat kylmäsiltoja, joiden lämpöhäviöt  $Q_{\text{kylmäsilta}}$  lasketaan kaavalla (Suomen rakentamismääräyskokoelma 2018)

$$Q_{\text{kylmäsilta}} = \sum l_k \Psi_k (T_s - T_u) \Delta t, \quad (5)$$

jossa  $l_k$  on viivamaisen kylmäsilan pituus ja  $\Psi_k$  on viivamaisen kylmäsilan lisäkonduktanssi (W/m,K). Kylmäsiltojen laskemisessa on huomioitava, että rakenteessa olevat kylmäsilat, esimerkiksi elementtien väliset liitokset, huomioidaan rakennusosan U-arvossa.

Rakennuksen vuotoilman aiheuttamaan lämpöhäviöön vaikuttaa rakennuksen tiiveys, sijainti ja korkeus. Vuotoilmavirtauksen aiheuttaa paine-ero, joka on seurausta lämpötilaeroista ja tuulesta. Vuotoilma ei sisällä ilmanvaihdon korvausilmatarvetta. Vuotoilman lämpöhäviö  $Q_{\text{vuotoilma}}$  lasketaan kaavalla (Suomen rakentamismääräyskokoelma 2018)

$$Q_{\text{vuotoilma}} = \rho_i c_{pi} q_{v,\text{vuotoilma}} (T_s - T_u) \Delta t, \quad (6)$$

jossa  $\rho_i$  on ilman tiheys  $1,2 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_{pi}$  on ilman ominaislämpökapasiteetti  $1000 \text{ J/kg,K}$  ja  $q_{v,\text{vuotoilma}}$  on vuotoilmavirta ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

Vuotoilman laskemista varten tarvitaan rakennusvaipan ilmanvuotoluku  $q_{50}$ , joka ilmaisee rakennusvaipan läpi kulkeutuvan ilmamäärän suhteessa vaipan pinta-alaan  $50 \text{ Pa}$  paine-erolla. Vuotoilma  $q_{v,\text{vuotoilma}}$  lasketaan kaavalla (Suomen rakentamismääräyskokoelma 2018)

$$q_{v,\text{vuotoilma}} = \frac{q_{50}}{3600x} A_{\text{vaippa}}, \quad (7)$$

jossa  $q_{50}$  on rakennusvaipan ilmanvuotoluku ( $\text{m}^3/\text{h}, \text{m}^2$ ),  $A_{vaippa}$  on rakennusvaipan pinta-ala ja  $x$  on kerroin, jonka arvo riippuu rakennuksen korkeudesta. Rakennusvaipan pinta-alaan lasketaan tässä yhteydessä mukaan myös alapohjan pinta-ala.

Rakennuksen tulo-poistoilmanvaihdon kuluttama energiamäärä riippuu ilmanvaihtomäärästä, ulkolämpötilasta ja ilmanvaihtokoneiden lämmöntalteenoton tehokkuudesta. Vakiolämpötilajärjestelmissä voidaan ilmamäärät laskea huomioimalla koneittain keskimääräinen vuorokautinen ja viikoittainen käyntisuhde. Muuttuvailmamääräisissä järjestelmissä täytyy laskelmassa käyttää aina kunkin ajanjakson, esimerkiksi tunti, keskimääräistä ilmapvirtaa. Muuttuvailmamääräisen tulo-poistoilmanvaihdon energiantarve ajanjaksolla  $Q_{iv}$  saadaan kaavasta (muokattu lähteestä Suomen rakentamismääräyskokoelma 2018)

$$Q_{iv} = \rho_i c_{pi} q_{v,tulo} ((T_{sp} - \Delta T_{puhallin}) - T_{lto}) \Delta t, \quad (8)$$

jossa  $q_{v,tulo}$  on keskimääräinen tuloilmavirta ajanjaksolla,  $T_{sp}$  on sisänpuhalluslämpötila,  $\Delta T_{puhallin}$  on lämpötilan nousu puhaltimessa ja  $T_{lto}$  on tuloilman lämpötila lämmöntalteenottolaitteen jälkeen.

Ilmanvaihtokoneelta huoneeseen tuleva ilma, jota tuloilmaksi kutsutaan, on muutaman asteen viileämpää kuin huoneilma. Ilma lämpiää huoneilman lämpötilaan huonetilojen lämmityslaitteiden avulla. Tuloilman lämmityksen sisääntulolämpötilasta huonelämpötilaan energiantarve ajanjaksolla  $Q_{iv,tuloilma}$  lasketaan jokaiselle ilmanvaihtokoneelle erikseen kaavalla (muokattu lähteestä Suomen rakentamismääräyskokoelma 2018)

$$Q_{iv,tuloilma} = \rho_i c_{pi} q_{v,tulo} (T_s - T_{sp}) \Delta t \quad (9)$$

Jos ilmanvaihto on toteutettu pelkällä poistoilmanvaihdolla tai painovoimaisella ilmanvaihdolla, tarvitaan korvausilmaa poistuneen ilmamäärän korvaamiseksi. Korvausilma otetaan esimerkiksi korvausilmaventtiileiden kautta hallitusti. Ilma lämmitetään rakennuksen huonelämmittimien avulla huonelämpötilaan. Yleisimmin yksittäisiä tiloja kuten porraskäytäviä on toteutettu pelkällä poistoilmanvaihdolla. Poistoilmanvaihdon tai painovoimaisen ilmanvaihdon tarvitsema energiamäärä tietyllä aikavälillä  $Q_{iv,korvausilma}$  lasketaan kaavalla (Suomen rakentamismääräyskokoelma 2018)

$$Q_{iv,korvausilma} = \rho_i c_{pi} q_{v,korvausilma} (T_s - T_u) \Delta t \quad (10)$$

Käyttöveden vaatima energiankulutus tietyllä ajanjaksolla  $Q_{lvk,netto}$  voidaan laskea kaavalla (Suomen rakentamismääräyskokoelma 2018)

$$Q_{lvk,netto} = \rho_v c_{pv} V_{lvk} (T_{lvk} - T_{kv}) \Delta t, \quad (11)$$



jossa  $\rho_v$  on veden tiheys,  $c_{pv}$  on veden ominaislämpökapasiteetti 4,2 kJ/(kg K),  $V_{lkv}$  on lämpimän käyttöveden kulutus ajanjaksolla ja  $T_{lkv} - T_{kv}$  on kylmän ja lämpimän käyttöveden lämpötilaero 50 °C.

Lämmitystarvetta vähentävät lämpökuormat, jotka vaikuttavat sisälämpötilaa nostavasti. Lämpöhäviöitä muodostuu ihmisistä, valaistuksesta ja sähkölaitteista, auringonsäteilystä ikkunoiden kautta sekä lämpimän käyttöveden varastoinnista ja kiertojohdosta. Lämpöhäviöiden hyödyntäminen mallinnetaan dynaamisesti laskentaohjelmalla. Rakentamismääräyskokoelman laskentaohjeesta (Suomen rakentamismääräyskokoelma 2018) saadaan kuukausittaisen lämpökuormien hyödyntämisasteet, kun käytetään kuukausitason laskentaa.

## 4.2 Ulkoalueiden sulanapitojärjestelmän energiankulutus

Kuten jo aiemmin mainittiin ulkoalueiden sulanapidon tarkoituksena on lumen poistaminen ja liukkauden estäminen. Sulanapitojärjestelmät kuluttavat paljon energiaa ja siksi niitä tehdään yleensä vain vilkkaasti liikennöidyille kävelyn ja kevyenliikenteen alueille keskustoissa sekä muuten hankalasti hoidettaville alueille. Yleisesti sulanapitojärjestelmiä on lastauslaitureilla sekä ajo- ja kävelyluiskilla. Pienet sulatusjärjestelmät tehdään yleensä sähkökäyttöisinä. Suuremmissa järjestelmissä käytetään liuoskiertoista jäähdytystä, jossa voidaan energian lähteenä hyödyntää myös matalalämpoisempiä lämmönlähteitä. Usein hyödynnetään kaukolämmön paluusta saatavaa lämpöä, mutta on mahdollista hyödyntää myös esimerkiksi lauhde- ja muita hukkalämpöjä tähän tarkoitukseen. Liuoksena käytetään yleensä vesipropyleeniglykoliliuosta jäätymisen estämiseksi. Propyleeniglykoli ei ole ympäristölle haitallista.

Sulanapitojärjestelmä sulattaa pintaan sataneen lumen, sulamisessa tuleva vesi johdetaan pois kallistuksilla. Kosteaa pintaa tulee vielä kuivata sulanapitojärjestelmän avulla. Lämpöhäviöitä tulee sekä alla olevaan maahan tai rakenteeseen että ympäristöön. Sulanapito-piirin alapuoleiseen rakenteeseen siirtyvän lämmön määrään vaikuttavat alapuolen rakenteiden lämmönjohtavuus, maan tai alapuolella olevan muun rakenteen lämpötilasta ja sulanapitopiirissä kiertävän liuoksen lämpötilasta. Alapuolen rakenteisiin suuntautuva häviöteho on vain 2-5 % kokonaistehosta, kun järjestelmän alla on eristävä kerros ja ulkoilmaa lämpimämpi maa. Jos rakenteen alla on kylmää, kuten silloissa ja kansirakenteissa, lämpöeristystä on oltava vähintään 60 mm, jotta saadaan toimiva lämmitys. (Sipilä et al. 2001)

Lumen sulatuksen vaatima lämmöntarve koostuu lumisateella lumen lämmittämisestä sulatuspisteeseen, lumen sulatuksesta sekä häviötehosta maahan. Lumisateen aikana lumipeite oletetaan estävän häviöt ympäristöön. Tämä lämpöteho tarvitaan niin kauan, kun sulatettavan pinnan päällä on lunta (kaavat muokattu lähteistä Sipilä et al. 2001 ja Ventä 2014):

$$q = q_{lumi} + q_{sulatus} + q_{maa}, \quad (12)$$

jossa  $q$  on tarvittava sulanapitojärjestelmän lämpöteho lumisateen aikana. Lämpöteho  $q_{lumi}$  tarvitaan lumen lämpötilan nostoon sulamislämpötilaan. Lumen sulattamiseen tarvitaan lämpöteho  $q_{sulatus}$  ja lisäksi maahan ja alla olevaan rakenteeseen suuntautuu lämpöhäviöt  $q_{maa}$ .

Lumen lämpötilan nostamiseen sulamislämpötilaan kuluva lämpö saadaan laskettua

$$q_{lumi} = \frac{v_l \rho_v c_{p,jää} (T_0 - T_{lumi})}{3600}, \quad (13)$$

jossa  $v_l$  on tuntinen sademäärä vedeksi muutettuna (mm/h),  $\rho_v$  on veden tiheys,  $c_{p,jää}$  on lumen (jään) ominaislämpökapasiteetti 2100 J/(kg °C),  $T_0$  on lumen (jään) sulamislämpötila 0 °C ja  $T_{lumi}$  on lumen lämpötila.

Lumensulatukseen kuluva lämpöteho saadaan

$$q_{sulatus} = \frac{\rho_v v_l r_l}{3600}, \quad (14)$$

jossa  $r_l$  on lumen (jään) sulamislämpö 333 000 J/kg.

Alapuoliseen maaperään suuntautuvan lämpöhäviön laskemisessa käytetään kaavaa

$$q_{maa} = \frac{T_{putki} - T_{maa,kk}}{\sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i}}, \quad (15)$$

jossa  $s_i$  on rakennekerroksen paksuus ja  $\lambda_i$  on rakennekerroksen lämmönjohtavuus. Rakenteen alapuolisen maan lämpötila tietyinä kuukautena  $T_{maa,kk}$  lasketaan kuten rakennuksien lämmitystehontarpeen laskennassa kaavan 4 mukaisesti. Putkikerroksen keskimääräinen lämpötila  $T_{putki}$  saadaan putkessa virtaavan nesteen menolämpötilan  $T_m$  ja paluulämpötilan  $T_p$  keskiarvona

$$T_{putki} = \frac{T_m + T_p}{2} \quad (16)$$

Jos käytössä on valmiiksi laskettu putkikerroksen alapuolisen rakenteen lämmönläpäisykertoimen arvo eli U-arvo  $U_{ap}$ , voidaan maahan suuntautuva lämpöhäviö esittää

$$q_{maa} = U_{ap} (T_{putki} - T_{maa,kk}) \quad (17)$$

Yllä olevalla kaavalla voidaan ratkaista alapuolisten rakenteiden suuntautuva lämpövirta myös silloin, kun sulanapitoputkiston alla on kansirakenne. Tällöin maan lämpötilan tilalla käytetään kansirakenteen alapuolisen tilan lämpötilaa ja lämmönläpäisykertoimen kansirakenteen U-arvoa.

Käytännössä lumen lämmittämis/een sulamislämpöön tarvittava teho on hyvin pieni verrattuna sulamislämpöön. Laskelmissa voidaan siten jättää lumen lämmittämiseen tarvittava teho huomioon ottamatta.

Lumisateen ja päällä olevan lumikerroksen sulatuksen jälkeen lämmöntarve muodostuu lämmönsiirrosta pinnasta ilmaan, vesikalvon höyrystymisestä sekä alapuolisiin rakenteisiin suuntautuvasta lämpöhäviöstä. Tämä voidaan laskea kaavalla

$$q = q_{ymp} + q_{höyr} + q_{maa}, \quad (18)$$

jossa  $q_{höyr}$  on veden höyrystämiseen tarvittava lämpöteho ja  $q_{ymp}$  on lämpöhäviö ympäristöön.

Lämmitystehotarkasteluissa on käytetty Sipilä et al. mukaan kadusta ilmaan siirtyvän lämpötehon laskennassa lämmönsiirtokertoimena  $15 - 20 \text{ W/m}^2, \text{ K}$ . Toteutetuissa katusulatuskohteissa on  $300 \text{ W/m}^2$  teho riittänyt katualueen pitämiseen  $+3 \text{ }^\circ\text{C}$  lämpötilassa  $-13 \text{ }^\circ\text{C}$  ulkolämpötilaan saakka. (Sipilä et al. 2000)

Ventä on insinööriytössään tehnyt kenttämittauksia sulanapitojärjestelmän toiminnasta lumisateen aikana. Mittausten mukaisesti teoreettiset laskelmat tehoista pitävät hyvin paikkaansa toteutuneen kanssa. Näissä kenttämittauksissa ei tutkittu sateen jälkeistä pinnan kuivumista ja kuivan rakenteen energiankulutusta. (Ventä 2014)

### 4.3 Lämmitysverkostojen mitoitus ja ohjaus

Rakennuksen erilaisille lämmitysjärjestelmille yleensä tehdään erilliset lämmitysverkot erilaisista lämpötilatasoista, käyttökohteista tai käyttöajoista johtuen. Ilmanvaihtolämmityspiiriin kuuluvat yleensä ilmanvaihtokoneiden lisäksi eteisten ja tuulikaappien kiertoilmakeit. Huonelämmittimille kuten patteri- ja säteilylämmittimille on yleensä oma lämmitysverkostonsa kuten myös mahdolliselle lattialämmitykselle. Kun rakennus lämmitetään kaukolämmöllä, käytetään lämmön siirtämiseen kaukolämpöverkosta rakennuksen verkostoihin lämmönvaihdinta. Jokaiselle lämmitysverkostolle on oma lämmönvaihtimensa. Lisäksi käyttövedelle on oma vaihtimensa.

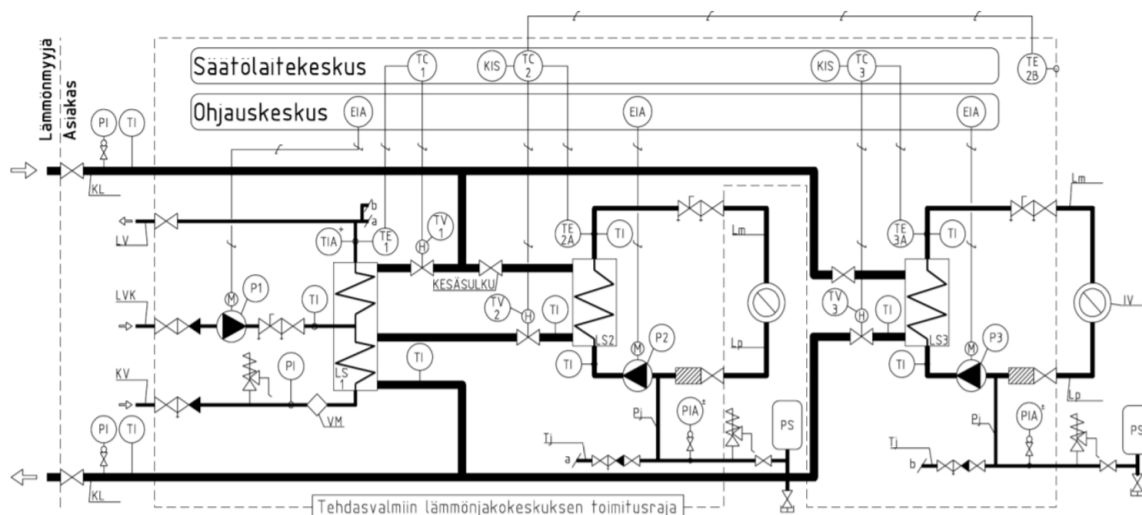
Lämmönvaihtimen ensiöpuolella virtaa kaukolämpövesi ja toisiopuolella rakennuksena lämmitysverkoston vesi. Kun tarvittava lämmitysteho ja jäähtymä siirtimessä tiedetään, voidaan veden massavirtaamat  $\dot{m}$  mitoittaa sekä ensiö- että toisiopuolella kaavalla

$$\dot{m} = \frac{Q}{c_p \Delta T}, \quad (19)$$

jossa  $Q$  on lämmitysteho,  $c_p$  on veden tai muun verkostossa virtaavan liuoksen ominaislämpökapasiteetti ja  $\Delta T$  on vesivirtaaman jäähtymä siirtimessä.

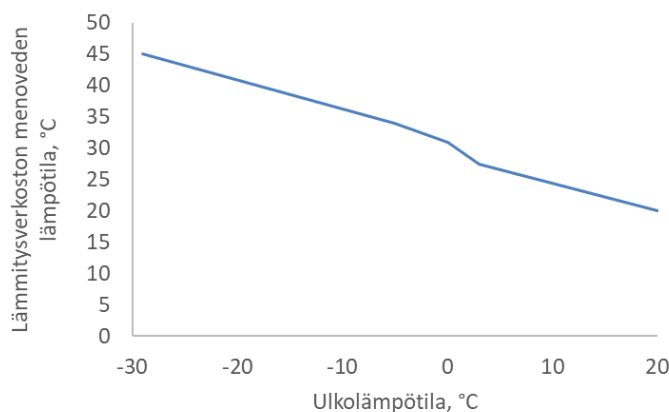
### 4.3.1 Rakennuksen lämmitysverkostot

Rakennusten lämmitysverkostojen esimerkkikytkentäkaavio on esitettyä kuvassa 5. Kaaviossa on esitettyä käyttövesi-, patteri- ja ilmanvaihtoverkostojen lämmönsiirtimien kytkentä. Tässä esimerkkikytkennässä käytetään käyttöveden lämmönsiirtimessä välisyöttökytkentää, joka tarkoittaa patteri- tai ilmanvaihtoverkoston ensiöpuolelta palaavan kaukolämpöveden lisäjähdyttämistä käyttövesiverkoston lämmönsiirtimessä. (Energiateollisuus ry 2014)



**Kuva 5** Esimerkkikytkentäkaavio kaukolämmön kytkennästä rakennuksen käyttö- vesi-, patteri- ja ilmanvaihtoverkostoihin. (Energiateollisuus ry 2014)

Lämmitysjärjestelmän perinteinen säätö on periaatteeltaan hyvin yksinkertainen. Lämmitysverkostojen menoveden lämpötilaa säädetään rakennusautomaation ohjaamana lämmönsiirtimen ensiöpuolella olevan säätöventtiilin avulla. Kuvassa 5 säätöventtiilit on merkitty TV1 käyttövesiverkosto, TV2 patteriverkosto ja TV3 ilmanvaihtoverkosto. Lämmitysverkostojen menoveden lämpötilan asetusarvoa säädetään automaatioon annettun säätökäyrän perusteella. Säätökäyrässä on esitetty menoveden lämpötilan arvo ulkolämpötilan funktiona. Lämmitysverkostojen menoveden enimmäislämpötilan tavoitearvot mitoitusulkolämpötilassa on annettu kaukolämmityksen määräyksissä ja ohjeissa K1-julkaisussa (Energiateollisuus ry 2014a). Lämmitysverkoston menoveden lämpötila laskee ulkolämpötilan noustessa. Tämän säädön tavoitteena on, että vesivirta lämmityspiirissä pysyy lähes samana ulkolämpötilasta riippumatta. Huonekohtainen tarkempi säätö toteutetaan vielä esimerkiksi patteriventtiileillä. Esimerkki tyypillisestä patteriverkoston säätökäyrästä on esitetty kuvassa 6. Patteriverkoston säätökäyrä ei yleensä ole aivan suora, vaan säätökäyrässä käytetään usein pientä nostoa ulkolämpötilan ollessa noin 0 °C.



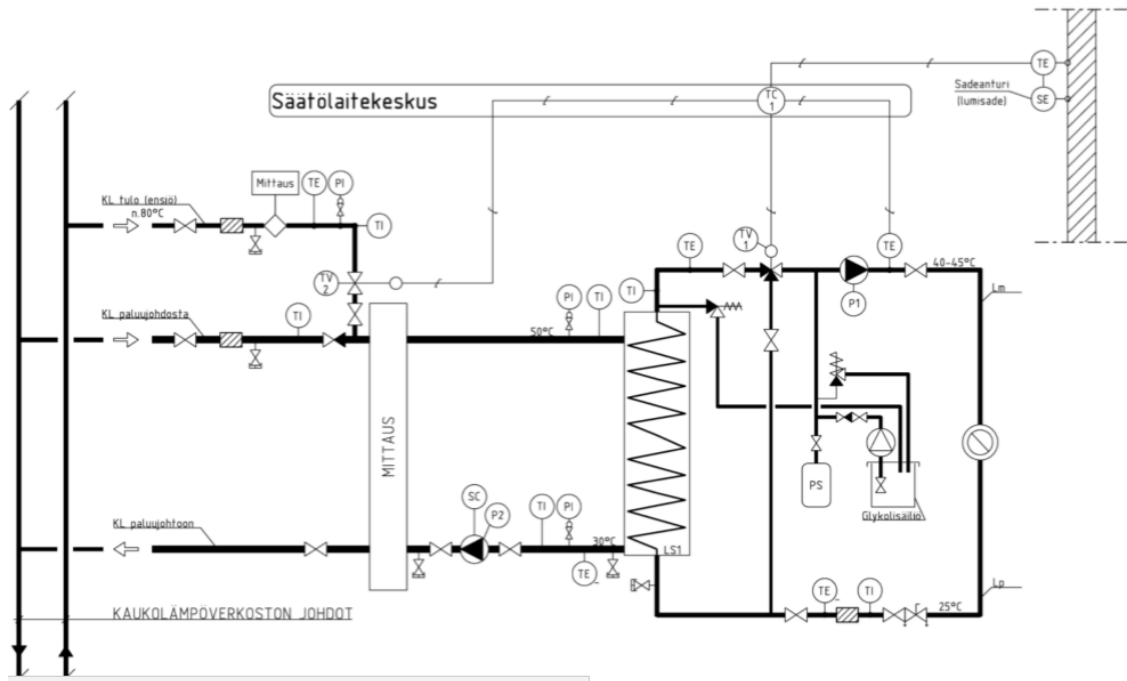
**Kuva 6** Esimerkki tyypillisestä patteriverkoston säätökäyrästä. Säätökäyrä antaa lämmitysverkoston menoveden lämpötilan ulkolämpötilan mukaan.

Lämmitysverkoston menoveden lämpötilan säädössä voidaan käyttää hyväksi myös huonelämpötiloja. Tämä säätötapa kuitenkin vaatii, että ainakin suurimmassa osassa huoneita on rakennusautomaatioon liitetty huonelämpötilan mittaus. Antureiden hintojen laskun ja langattomien antureiden tekniikan kehittymisen myötä myös tämä säätötapa lisääntynee tulevaisuudessa. Huonelämpötilojen mittausten avulla voidaan myös laskea hetkellisesti verkostojen lämpötilaa, jolloin voidaan tasata kaukolämpöverkostojen tehohuipputa. Tällaista säätötapaa markkinoidaan myös erillisenä palveluna, jolloin palveluntuottaja tuo langattomat mittausanturit huoneistoihin sekä toimittaa ohjausviestit rakennusautomaatioon.

### 4.3.2 Sulanapitoverkosto

Sulanapitoverkostoissa yleisesti käytetään ensisijaisena lämmönlähteenä kaukolämmön paluuvettä. Paluuvesi voi olla kohteesta riippuen joko koko kaukolämpöverkoston tai ainoastaan yhden kohteen paluuvettä. Lumisateiden aikana paluuvesi ei riitä lämmitykseen, vaan tarvitaan lisälämpöä kaukolämmön menovedestä. Kytkeä voidaan tehdä esimerkiksi K1-julkaisun ohjeen mukaisesti. K1-julkaisun ohjeen mukainen esimerkkikytkentä on esitetty kuvassa 7. (Energiateollisuus ry 2014)

Sulanapitojärjestelmää ohjataan sekä ulkolämpötilan että sadetietojen perusteella. Sadetietoa kerätään lumisadeanturilla, joka voi olla erillinen tai osana sääkeskusta. On mahdollista käyttää myös sääennusteita ohjaavana tekijänä.



*Kuva 7 Sulanapitojärjestelmän esimerkkikytkentäkaavio. (Energiateollisuus ry)*

### 4.3.3 Kaukolämpöverkosto

Lämmitystehon tarve kaukolämpöverkossa muodostuu rakennusten ja ilmanvaihdon lämmitystarpeesta sekä käyttöveden lämmitystarpeesta. Lisäksi tarvittavaan tehoon vaikuttavat muut kaukolämmitykseen liitetyt järjestelmät kuten sulanapitojärjestelmät.

Rakennusten lämmityksen tehonvaihtelut ovat hitaita. Siksi rakennusten lämmitysten osalta kaukolämmön tuntinen enimmäistehontarve ja sitä kautta lämmönsiirtimet ja liittymäkoko mitoitetaan rakennusten LVI-suunnitelmissa lasketun lämmitystehon tarpeen mukaan. LVI-suunnitelmien lämmitystehontarpeen laskennassa tulee hyödyntää tehtyjä mallinnuksia varsinkin, jos rakennuksessa on käytössä tarpeenmukaisia järjestelmiä esimerkiksi ilmanvaihdon osalta. Muutoin riskinä on, että siirtimet ja kaukolämpöliittymät mitoitetaan huomattavasti liian suuriksi. Liittymien liian suuri mitoitus toisaalta aiheuttaa ylisuuria investointeja lämpöyhtiölle ja toisaalta lisää asiakkaan kustannuksia sekä liittymis- että perusmaksujen osalta.

Käyttöveden kulutus vaihtelee hetkellisesti suurestikin yhdessä rakennuksessa. Kuitenkin kaukolämpöverkossa tehovaihtelut tasaantuvat, koska eri rakennusten huipputehon tarpeet ovat eriaikaisia eli tehontarpeet risteilevät keskenään. Tästä syystä kaukolämpöverkkoa mitoitettaessa voidaan käyttää käyttöveden osalta tuntista keskiarvoa. Rakennuksen lämpimän käyttöveden hetkellinen suurin tehontarve voidaan laskea lämpimän käyttöveden mitoitusvirtaaman avulla. Mitoitusvirtaamat lasketaan rakentamismääräysten ohjeiden mukaisesti LVI-suunnitelmiin. Rakennuksen käyttövesisiirrin mitoitetaan aina het-

kellisen tehontarpeen mukaan. Käyttöveden lämmityksen vaatima kaukolämpöteho mitoitetaan käyttövesisiirtimen mitoitustehon ja taulukon 2 avulla. (Energiateollisuus 2014b)

**Taulukko 2.** *Kaukolämpöjärjestelmän mitoitusta varten käytettävä käyttöveden tuntinen teho arviona asuinrakennuksen käyttövesisiirtimen mitoitustehosta (Energiateollisuus 2014b)*

asuntojen lukumäärä	osuus käyttövesisiirtimen mitoitustehosta
1	10 %
2 – 5	15 %
6 – 100	20 %
yli 100	25 %

Edellä esitetty käyttöveden mitoitusperuste on käytössä perinteisessä kaukolämpöverkossa asuntokohteissa. Jos energiayhteisössä on useita asiakkaita, voidaan suoraan käyttää yllä olevaa mitoitusta. Jos taas asiakkaita on vain vähän, tulee käyttöveden tehontarve ottaa huomioon suuremmalla painoarvolla. Muissa kohteissa kuin asuintaloissa käyttöveden osuus tarkastellaan tapauskohtaisesti.

Edellä olevalla tarkastelulla saadaan selville enimmäistehontarpeet kohteessa. Kun halutaan tarkastella tarkemmin kaukolämmityksen tarvetta eri ajankohtina, erilaisilla käyttötarkoituksilla ja eri sääolosuhteilla, tarvitaan uuden rakennuksen osalta mallinnuksia tai samanlaisen kohteen mitattua energiankulutustietoa. Tällöin lasketaan yhteen tarkasteltavan rakennuksen tuntiset tehot rakennuksen, ilmanvaihdon ja käyttöveden lämmityksen osalta. Tarvittaessa lisätään erikoisjärjestelmien kuten sulanapitojärjestelmän tuntinen teho.

## 5. ENERGiantuotanto PIENISSÄ ALUEELLISISSA RATKAISUISSA

Tässä työssä tutkitaan pientä, korttelikokoluokan, alueellista energiantuotantoratkaisua. Lempäälän kuntakeskuksen korttelikohtaisessa energiaratkaisussa haetaan kokonaisvaltaista energian käytön ja tuoton hallintaa. Energiaa tuotetaan niin sähkö-, lämpö- kuin kylmäverkostoon. Energiantuotantoa ja -käyttöä ohjataan älykkäillä automaattioratkaisuilla. Tuotannon ja kulutuksen vaihteluiden hallintaan käytetään myös energiavarastoja.

Tässä luvussa käsitellään energiantuotannon ja -varastoinnin perusteet sekä tutustutaan Suomessa toteutettuihin ja käynnissä oleviin alueellisiin korttelimittaluokan energiahankkeisiin, joissa käytetään hyväksi ainakin pienimuotoista sähkön ja lämmön yhteistuotantoa. Energiantuotantoratkaisuisissa keskitytään laaja-alaisiin energiaratkaisuihin, joten tässä työssä ei tarkastella pelkästään alueellista lämmöntuotantoa. Energiankäytön osuus tarkasteltiin luvussa 4 Energiankulutus rakennuksissa.

Yritysalueelle suunnatussa LEMENE-hankkeessa, joka esiteltiin luvussa 2, sähköenergian tuotantoon käytetään aurinkopaneeleita, yhdistettyyn sähkön- ja lämmöntuotantoon kaasumoottoreita ja polttokennoja. Sähköä varastoidaan akustoihin. Lempäälän kuntakeskuksen korttelikohtaisessa energiantuotannossa on tarkoitus hyödyntää edellä mainittuja tekniikoita pois lukien polttokennot.

Sähköntuotannon alueellisessa ratkaisussa on tarkoitus käyttää tuotettu sähköenergia paikallisesti omaa sähköverkkoa hyödyntäen. Tällöin vältetään sähköverkkoyhtiön käyttämistä sähkön siirtoon ja sitä kautta vältetään sähkön siirtomaksut. Korttelikohtaisen energiayhteisön oma sähköverkon on tarkoitus palvella vain saman omistajan, eli tässä tapauksessa kunnan, hallinnoimia kiinteistöjä. Jos pienimuotoinen sähköntuotanto jää alle 800 MWh vuodessa, vältetään myös sähköverolta. Aiemmin luvussa 3 käsitellyn hallituksen energiastrategian ja sitä tukevan älyverkkotyöryhmän loppuraportin mukaisesti sähkön hinnoittelua tullaan tulevaisuudessa muuttamaan enemmän kysyntäjoustoa suosivaan suuntaan. Kuluttajan sähkö, mukaan lukien siirtohinnat, tulee siis maksamaan enemmän, jos kulutusta on enemmän kuin tuotantoa ja päinvastoin. Samoin käytössä oleva sähköverkon kapasiteetti vaikuttaisi näin hinnotteluun. Tämä tulee muuttamaan sähkön hetkellisiä hintoja myös kuluttajille tulevaisuudessa. Tällä hetkellä sähkön tukkuhinta muuttuu kysynnän ja tarjonnan mukaan, mutta kuluttajahinta ei. Hinnoittelurakenteen muutoksen myötä tärkeään rooliin nousevat energiavarastot ja paikallinen tuotanto. Kalliin sähkön aikaan pysytään myös sähköä myymään ulkopuolelle, jos sähköntuotantoa on yli oman kulutuksen. Pienet alueelliset sähkövarastot ja -tuotannot voivat toimia tulevaisuudessa myös joustavina valtakunnallisena sähkön tehoreserveinä.



## 5.1 Aurinkopaneelit

Aurinkopaneelin teho ilmoitetaan nimellistehon mukaan ja sen yksikkönä käytetään piikkiwattia  $W_p$ . Nimellisteho on aurinkopaneelin tuottama teho standardiolosuhteissa, jossa auringon säteily määrä on  $1000 \text{ W/m}^2$  ja kennon lämpötila on  $25^\circ\text{C}$ . Auringon säteilyteho voi Suomessakin ylittää  $1000 \text{ W/m}^2$  kirkkaana kesäpäivänä. Talvella ja pilvisellä ilmalla säteilyteho on huomattavasti pienempi. Toisaalta matalampi ympäristön lämpötila vaikuttaa tehoa nostavasti. Koska Suomessa aurinko paistaa matalalta talvipäivinä ja kesäaamuina ja -iltoina, voidaan tällaisissa olosuhteissa hyödyntää myös rakennuksen ulkoseinän suuntaista paneelia. Tällöin saadaan hyödynnettyä myös lumesta heijastuva säteily. Suomessa pohjoisen sijaintimme vuoksi on hyödynnettävissä huomattavia määriä auringon hajasäteilyä, joka heijastuu pilvistä, ilmakehästä ja maasta. Hajasäteilyn vuoksi säteilyä on hyödynnettävissä huomattavia määriä myös muista tulosuunnista kuin auringon suorasäteilyn suunnasta. Tästä syystä aurinkopaneelien suutauksella Suomen olosuhteissa on vähemmän vaikutusta kuin etelämmässä.

Aurinkopaneeleista saatava sähkövirta on tasavirtaa ja sähköverkosta saatava virta on vaihtovirtaa. Invertterin eli vaihtosuuntaajan tehtävä aurinkosähköjärjestelmässä on muuntaa paneeleista saatava tasavirta vaihtovirraksi ennen sähköverkkoon syöttämistä. Jossain tapauksissa voidaan hyödyntää tasavirtaa suoraan virtalähteenä. Kuten esimerkiksi LEMENE-hankkeessa käytetään tasavirtaa ledeillä toteutetussa katuvalaistuksessa.

Aurinkopaneelit ovat kehittyneet viime vuosina nopeasti ja samalla niiden hinta on pudonnut. Yksittäinen aurinkopaneeli suuremmissa aurinkopaneelijärjestelmissä on yleensä kooltaan  $1,6 \text{ m}^2$ . Tämän kokoisen aurinkopaneelin nimellisteho on peruspaneelilla luokkaa  $270 \text{ W}_p$ , mutta markkinoilla on myös esimerkiksi  $325 \text{ W}_p$  tehoisia aurinkopaneeleita. Aurinkopaneelin laadun lisäksi aurinkosähköjärjestelmän tuottoon vaikuttavat paneelien suuntauskulma, puhtaanapito sekä varjostukset. Myös aurinkosähköjärjestelmän invertterien laatu ja hyötysuhde vaikuttaa tuottoon. Aurinkopaneelien tekninen elinikä on yli 30 vuotta. Tehontuottotakuun voi saada 25 vuodelle. Invertterin tekninen käyttöikä on noin puolet paneelien käyttöiästä.

## 5.2 Kaasumoottori yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa

Kaasumoottorilla tuotetaan sekä lämpöä että sähköä. Pienimuotoisen sähköntuotannon rajaksi sähkömarkkinalaki määrittelee 2 MVA (Sähkömarkkinalaki 2019). Tätä voidaan pitää myös pien-CHP:n ylärajana.

Kaasumoottorit ovat ottomoottoreita. Ottomoottorissa polttoaine sekoitetaan ilman kanssa ennen sylinteriin syöttämistä. Ottomoottorissa voidaan käyttää stökiometristä seossuhdetta, jonka avulla saadaan seoksen lämpöarvo ja sitä kautta työ jaksoa kohti suu-

rekse. Kaasumootoreiden koko verrattuna tehoon on huomattavasti pienempi kuin esimerkiksi turbiineilla. Kaasumootorit soveltuvat pienen kokonsa vuoksi tämän kokoluokan sähköntuotantoon.

Kaasumootoreilla heikkoutena suuri huollon tarve. Peruskorjausväli on noin 15 000 – 30 000 käyttötuntia. Tämä tarkoittaa, että männät, sylinterit ynnä muut sellaiset vaihdetaan noin 2-4 vuoden välein. Huoltoväli (öljynvaihto) polttomootoreilla on noin 2000-5000 tuntia. Moottorin tyypillinen käyttöaika on 15 vuotta.

Kaasumootorissa voidaan käyttää maa- tai biokaasua polttoaineena. Kaasumootorissa käytettävä biokaasu voi olla myös lämpöarvoltaan huonompaa kuin maakaasu. Tämä mahdollistaa uusiutuviin energialähteisiin perustuvan energiantuotannon.

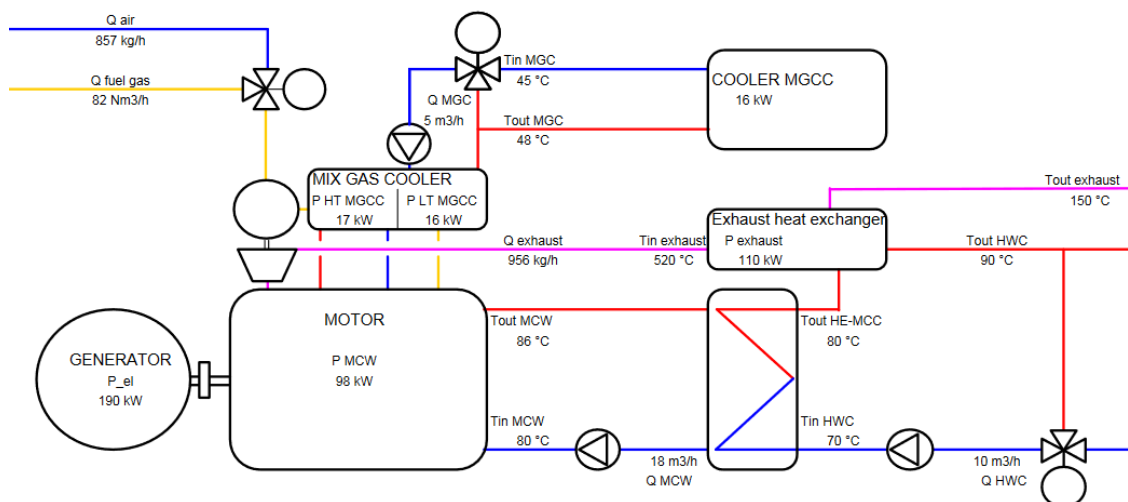
Lämmöntuotantoa varten lämpöä voidaan ottaa talteen moottorin jäähdytyksestä sekä savukaasuista. Jäähdytystä tarvitaan edellisten lisäksi myös kaasu-ilmaseoksen jäähdytykseen. Seosta jäähdytetään, jotta saadaan tilavuutta pienennettyä ja sitä kautta tehoa suurennettua. Kaasu-ilmaseoksen jäähdytysveden lämpötila tulee olla alle 50 °C. Tähän riittää matalalämpötilaisesta aluelämpöverkosta palaavan veden lämpötila, joka on enimmillään 33 °C. Kaasumootorin ja savukaasujen hukkalämmöistä saatava aluelämpöverkoston lähtevän veden lämpö on enimmillään 90 °C. Tämä ei riitä perinteiseen kaukolämpöverkkoon, jossa rakennukseen tulevan menoveden lämpötila mitoitusukolämpötilassa on 115 °C. Kaukolämpöverkon mitoituslämpötila vyöhykkeellä II, johon Tampereen seutu kuuluu, on -29 °C. Savukaasuista tapahtuvassa lämmöntalteenotossa on myös huomioitava, että savukaasujen lämpötila tulee olla vähintään 130 °C, jotta kondensoitumista savupiippuun ei tapahdu. Jos jotain hukkalämpöä ei pysty hyödyntämään kaukolämmitykseen, voidaan sitä hyödyntää perinteisen lämpökattilan polttoilman esilämmittämiseen. Kaasumootorin lisäksi sähköntuotantoon tarvitaan generaattori.

Kaasumootorin sähköntuotannon hyötysuhde voi olla jopa 40%. Lämmöntuotannon hyötysuhde on tätä hieman suurempi. Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotannon kokonaisyötysuhde on parhaimmillaan 85 % luokkaa. Kun kaasumootoria käytetään osateholla, sähköntuotannon hyötysuhde laskee jonkin verran ja lämmöntuotannon nousee. Kokonaisyötysuhde pysyy lähes samalla tasolla riippumatta tehosta. Käytännössä moottorina käytetään aina vähintään 40 % teholla enimmäistehosta.

CHP-moduulin voi hankkia kokonaisuutena, joka sisältää valmiiksi kaasumootorin, generaattorin ja lämmönvaihtimet moottorin jäähdytystä varten ja lämmöntalteenottoon savukaasuista. Tällöin kokonaisuus voi pitää sisällään myös tarvittavan putkituksen sekä säädön ja ohjauksen.

Esimerkki kaasumootorin kytkentäkaaviosta on esitettyä kuvassa 8. Tässä kaaviossa on esitettyä itävaltalaisen Intelligente Energie Technik GmbH:n (IET) CHP-yksikön kytkentä. Tässä esimerkissä kaasumootorin sähköteho on 190 kW. Lämpötehoa saadaan

moottorijäähdytyksestä ja savukaasuista yhteensä 225 kW. Lisäksi tarvitaan kaasuseoksen erillistä jäähdytystä. Jäähdytystehoa tähän tarvitaan 16 kW. Sähköntuotannon hyötysuhde on 38,5 % ja lämmöntuotannon 45,6 %. Kokonaishyötysuhde 84,2 %. (Höyrytys Oy 2019)



**Kuva 8.** Kaasumoottorin esimerkkikytkentäkaavio. Esimerkkinä itävaltalaisen Intelligenie Energie Technik GnbH:n sähköteholtaan 190 kW<sub>e</sub> CHP-yksikkö. Lähde Höyrytys Oy.

Kaasumoottorilla tuotetaan sähköä silloin, kun aurinkoenergiaa ei ole tarjolla riittävästi ja ostetun sähkön hinta on niin korkea, että kaasumoottorilla kannattaa sähkö tuottaa. Lempäälän kuntakeskuksen energiaratkaisussa lämpöä voidaan tuottaa myös kolmessa kaasukattilassa, jotka lämpölaitoksella ovat jo olemassa. Perinteiseen kaukolämpöverkoon syötetty vesi on lämpimämpää talviaikaan kuin kaasumoottorin savukaasuilla lämmitetty vesi. Kesäaikana kaasumoottorilla tuotettu lämpö riittää myös perinteiseen kaukolämpöverkostoon. Taloudellisesti tärkeää on optimoida sähkön ja lämmön tuotanto kunakin hetkenä parhaimmalla tavalla. Tähän optimointiin tarvitaan automaatiota ja älykästä ohjausta.

### 5.3 Energiavarastot

Sähköenergiaa voidaan varastoida kapasitiivisesti kondensaattoriin, käyttää varastoinnissa hyväksi suprajohteita ja niiden magneettikenttiä tai kemiallisesti akkuun. LEMENE-hankkeessa käytetään varastoina akkuja, kuten suunnitellaan käytettäväksi myös Lempäälän kuntakeskuksen korttelikohtaisessa energiaratkaisussa.

Akkujen tehoon käyttöaikana vaikuttaa oleellisesti akkujen käyttö. Akkujen optimaalisiin latausaste on noin 40 %. Akkujen purkaminen kokonaan eli syväpurkaminen vähentää

huomattavasti akusta saatavia lataussyklejä. Myös suuremmissa akustoissa akkujen tasainen lataaminen ja käyttö varmistavat akkujen pidemmän käyttöajan. Saatavan sähkövirran laatu taas on tärkeä seikka asiakkaan kannalta. Akkujen ohjausjärjestelmäteknologia on siksi hyvin tärkeä osa akustoja. Sähköakustojen mitoitus ei tarkemmin käsitellä tässä työssä.

Lämpö- ja kylmäenergiaa tässä kokoluokassa voidaan varastoida lämpö- ja kylmäakkuihin, jotka käytännössä ovat vesivaraajia. Itsessään kaukolämpö- ja kaukokylmäverkostot toimivat myös lyhytaikaisen lämmön ja kylmän varastoinnissa. Kaukokylmän varastoinnista enemmän seuraavassa luvussa.

## 5.4 Kaukokylmä alueellisena ratkaisuna

Kaukokylmä on yleistynyt viime vuosina erityisesti suurimpien kaupunkien keskusta-alueilla. Kaukojäähdytyksen kylmänlähteenä Suomessa käytetään vapaata jäähdytystä, kompressorijäähdytystä, lämpöpumppuja sekä absorptiotekniikkaa hyväksi käyttävää jäähdytystä. Vapaajäähdytys käyttää hyväksi ympäristön tai vesistöjen matalaa lämpötilaa. Kompressorijäähdytyksessä kylmä tuotetaan yleensä sähkökäyttöisen kompressorin avulla. Lämpöpumpuilla siirretään kiinteistöistä kaukojäähdytyksen paluueden mukana tuleva yllilämpö kiinteistöjen lämmitykseen tai kaukolämpöveteen. Absorptiotekniikassa lämmöllä tuotetaan jäähdytystä. Suomessa kaukojäähdytystä on 10 paikkakunnalla. (Energiateollisuus ry 2018)

Tässä työssä käsiteltävässä korttelikohtaisessa energiantuotannossa kaukokylmäverkosto tuodaan alueelle. Pääosin kaukokylmä tuotetaan vapaajäähdytyksellä. Lisäjäähdytys tuotetaan kompressiotekniikalla. Tässä työssä tarkastellaan mahdollisuutta lisäksi tuottaa lämmöllä jäähdytystä, jos kaikkea sähköntuotannon ylijäämänä syntynyttä lämpöä ei saada kulutetuksi lämpöverkossa.

### 5.4.1 Vapaajäähdytys

Vapaajäähdytys hyödyntää matalampaa lämpötilaa esimerkiksi ulkoilmassa, vesistöissä tai pohjavedessä kylmän tuotantoon. Suomessa on yleisesti hyvät olosuhteet vapaajäähdytyksen käyttöön suuren osan vuodesta. Kesällä kuumimpaan aikaan tarvitaan kuitenkin vapaajäähdytyksen rinnalle muita jäähdytystekniikoita.

Suomessa käytetään kylmän lähteenä vapaajäähdytyksessä meri-, järvi- ja jätevettä sekä ilmaa. Yhteensä vapaajäähdytyksen teho on enintään 168 MW. Teho vaihtelee vuoden-aikojen mukaan. (Energiateollisuus ry 2018) On kuitenkin huomioitava, että käytettäessä vesialueita tai pohjavettä jäähdytykseen tarvitaan vesialueen omistajan luvan lisäksi vesilain mukainen lupa.

Lempäälän kuntakeskuksen kaukokylmäverkkoa varten saadaan jäähdytystä Pyhäjärvestä. Terveyskeskus sijaitsee Pyhäjärven rannassa. Kaukokylmäverkosto on nyt terveyskeskuksella ja hammashoitolassa, josta kuntakeskukseen on vajaan kilometrin matka.

### 5.4.2 Kompressorijäähdytys

Kompressoritekniikka käyttää hyväksi kylmäainetta, joka höyrystyy matalassa paineessa. Höyrystimeen tuodaan kylmäaine ja lämpöä jäähdytettävästä kohteesta. Kun kylmäaine höyrystyy, jäähdytyskierrossa oleva vesi jäähtyy. Höyrystyneen kylmäaineen paine nostetaan kompressorilla. Tällöin höyry tulistuu. Tulistunut höyry lauhdutetaan lauhduttimessa nesteeksi, joka jälleen kylmäaine kiertää paisuntaventtiilissä tapahtuvan paineenalennuksen jälkeen takaisin höyrystymiseen. Lauhduttaminen voidaan tehdä joko ilma- tai nestelauhdutteisesti. Lauhdelämpö voidaan myös hyödyntää matalalämpöjärjestelmissä suoraan tai lämpöpumppua hyväksi käyttäen. Kompressorit ovat yleensä sähkökäyttöisiä. Myös polttomoottorikäyttöisiä kompressoreja on olemassa.

Kompressoritekniikka on eniten käytetty tekniikka jäähdytysjärjestelmissä, kun huomioidaan myös kiinteistökohtaiset järjestelmät. Kaukojäähdytyksessä lämpöpumput ovat ohittaneet perinteisen kompressorijäähdytyksen viime vuosina käytetyimpänä tekniikkana, kun lasketaan tuotettua energiamäärää. (Energiateollisuus ry 2018)

Jäähdytyksen hyötysuhdetta ilmaistaan kylmäkertoimen COP (coefficient of performance) tai EER (energy efficiency ratio) avulla. EER on eurooppalaisen lämpöpumpustandardin mukainen kylmäkerroin ja COP lämpökerroin. Merkintää COP kylmäkertoimena käytetään kuitenkin yleisesti kirjallisuudessa. Tässä työssä käytetään kylmäkertoimesta lyhennettä COP. Kylmäkertoimen arvot annetaan nimellisolosuhteissa. Vuosihyötysuhde SEER tai SCOP kuvaisivat paremmin vuotuista hyötysuhdetta, mutta näille ei ole standardoituja määritelmiä. Kompressiotekniikalla on mahdollisuus uudemmilla järjestelmillä päästä kylmäkertoimessa luokkaan 4 – 5. (Laitinen et al. 2016)

### 5.4.3 Lämpöpumpputekniikat

Lämpöpumppujen toimintaperiaate on sama kuin kompressoritekniikkaa käyttävillä kylmäkoneilla. Lämpöpumpuilla lämpöä otetaan talteen esimerkiksi jätevesistä, teollisuuden hukkalämmöistä tai kiinteistöissä lämmenneestä kaukokylmävedestä. Kun otetaan lämpöä talteen kylmäaineeseen kaukokylmän paluuvdestä ja lauhdutetaan kylmäaineen lämpö kaukolämpöveteen, saadaan yhdistetty lämmön ja kylmän tuotanto.

Helsingin Sörnäisissä on maailman suurin lämmön- ja kylmäntuotantoa yhdistävä Katri Valan lämpöpumppulaitos. Siellä lämpöä otetaan talteen sekä jätevesistä että kaukojäähdytyksen paluuvdestä. Lämpöpumpun avulla saadaan lämpö nostettua 90 °C lämpötilaan ja kaukokylmän lämpötila saadaan laskemaan 4 °C lämpötilaan. Kun jäähdytystarve kesäaikaan on suurinta, pystytään tuottamaan noin 250 000 henkilön lämmin käyttövesi

kaukojäähdytyksestä talteenotetulla lämmöllä. (Energiateollisuus 2016) Vuonna 2017 Helsingin kaukojäähdytyksestä 90 000 MWh tuotetaan Katri Valan lämpöpumppulaitoksella. Tämä on 60 % koko Helsingin kaukokylmän myynnistä. Vuonna 2018 valmistui myös Esplanadin puiston alle lämpöpumppulaitos kaukolämmön ja -kylmän yhteistuotantoon. Kahden uuden lämpöpumpun jäähdytysteho on yhteensä 15 MW ja lämmitysteho 22 MW. Ennestään Esplanadin jäähdytyskeskuksessa on ollut kylmävesiakku, jonka teho on 35 MW. (Helen 2017)

#### 5.4.4 Lämpöä hyväksi käyttävät tekniikat

Lämpöä hyväksi käyttäviä kylmätekniikoita ovat absorptio- ja adsorptioteknologiat sekä ilmanvaihtoon integroitu kuivatusjäähdytys. Absorptiossa käytetään hyväksi liuotin-kylmäaine-parin käyttäytymistä liuoksena. Yleisimmät käytettävät aineparit ovat vesi – litiumbromidi, jossa vesi toimii kylmäaineena, ja ammoniakki – vesi, jossa vesi on liuottimena. Vesi – litiumbromidi -aineparia käytetään yleensä silloin, kun jäähdytyslämpötila on korkeampi kuin 0 °C. Tiettyssä paineessa ja lämpötilassa nesteen ja absorpoituneen kaasun välillä on tasapaino. Muutos paineessa ja lämpötilassa muuttaa tasapainoa, ja siten höyryä joko sitoutuu tai sitä vapautuu. Absortiolaitteiston neljä pääosaa ovat keitin, lauhdutin, höyrystin ja imeytin. Keittimessä liuoksen lämpötilaa nostetaan ulkopuolisen lämpöenergian avulla. Ulkopuolinen lämpö tuodaan vähintään 80 °C lämpötilassa. Keittimestä höyry johdetaan lauhduttimeen, jossa höyry lauhtuu nesteeksi. Höyrystimessä on matalampi painetaso ja siten neste höyrystyy uudelleen. Höyrystyminen sitoo energiaa ja siten jäähdyttää kylmäainepiirin virtausta. Imeyttimessä höyrystimestä palaava lauhtuva kaasu sekoittuu väkevöityneeseen liuokseen matalassa painetasossa. Sekä imeytin että lauhdutin vaativat jäähdyttävän vesivirtauksen, jonka tyypillinen lämpötilataso on noin 30 °C. (Laitinen et al. 2016)

Absorptiotekniikassa käytettiin kylmäaineen imeyttämiseen nestettä. Adsorptiotekniikka eroaa periaatteeltaan siinä, että imeyttämiseen käytettävä adsorbentti on kiinteää ainetta. Tällöin kylmäaineena käytettävän veden aineparina käytetään joko silikageeliä tai zeoliittia. Adsorptiossa kylmäaineena toimiva vesi höyrystetään höyrystimessä alhaisessa paineessa ja lämpötilassa. Höyrystymisen vaatima lämpö sidotaan jäähdytyspiiristä, jolloin jäähdytyspiirin vesi jäähtyy. Syntynyt vesihöyry imeytetään adsorbaattorissa kiinteään aineeseen, adsorbenttiin. Tästä vapautuva lämpö jäähdytetään välijäähdytyspiirillä, jonka lämpötilataso on samaa luokkaa kuin absorptiotekniikalla. Tämän jälkeen adsorbaattorissa vesi höyrystetään pois adsorbentista. Höyrystämiseen käytetään lämpöä, jonka lämpötila on vähintään 55 °C. Vesihöyry johdetaan tämän jälkeen lauhduttimeen, jossa höyry lauhtuu välijäähdytyksen avulla takaisin vedeksi. Adsorptioprosessissa käytännössä vaaditaan kaksi adsorbaattoria johtuen prosessien vaihteellisuudesta. Adsorptiojäähdytyksen etu absorptiojäähdytykseen verrattuna ovat alemman lämpötilan lämpövirtaamien käytön lisäksi alhaisemmat huoltokustannukset.

Lämpöä hyväksi käyttävissä tekniikoissa tarkastellaan kylmäkertoimella erikseen lämmön- ja sähkönkäytön tehokkuutta. Lämmönkäytön kylmäkerroin  $COP_{\text{lämpö}}$  on jäähdytystehon suhde käytettyyn lämpöön. Vastaavasti sähkönkäytön kylmäkerroin  $COP_{\text{sähkö}}$  on jäähdytystehon suhde käytettyyn sähkötehoon.

Sorptiotekniikkaa käyttävillä kylmäkoneilla on huomattavasti huonommat kylmäkertoimet kuin perinteistä kompressiotekniikkaa käyttävillä jäähdytyskoneilla. Vuosittaiset kylmäkertoimet lämpöenergian suhteen absorptiotekniikalla  $SCOP_{\text{lämpö}}$  ovat luokkaa 0,7 – 0,75- Vesi – litiumbromidi -aineparia käytettäessä keittimeen tulevan lämpimän veden lämpötila tulee olla vähintään 80 °C. Matalammat lämpötilat laskevat kylmäkerrointa nopeasti. Adsorptiotekniikalla  $SCOP_{\text{lämpö}}$  on hieman huonompi, luokkaa 0,6 – 0,65. Jos lämpö adsorptioprosessiin tuodaan alle 65 °C lämpötilassa, jää kylmäkerroin tätäkin huonommaksi (Laitinen et al. 2016). Sorptiotekniikka on siten käyttökelpoisinta silloin, kun käytettävissä on hukkalämpöä, joka on ilmaiseksi tai lähes ilmaiseksi saatavissa. Lämmön käyttö jäähdytyksen energianlähteenä lisäksi mahdollistaa suuremman käyttöajan lämmön ja sähkön yhteistuotannolle. Sorptiojärjestelmissä on otettava huomioon myös sähkökäyttö ja huolellinen suunnittelu. Hyvin suunnitellun sorptiojärjestelmän  $SCOP_{\text{sähkö}}$  on luokkaa 8 – 10. Adsorptiojärjestelmässä sähkönkäyttö on hieman pienempää ja siten  $SCOP_{\text{sähkö}}$  on suurempi kuin absorptiossa. Huonosti suunnitellun järjestelmän  $SCOP_{\text{sähkö}}$  saattaa olla alle 5, jolloin lähestytään kompressiotekniikan COP-lukemia sähkön osalta.

Absorption käyttöä sähkön, lämmön ja jäähdytyksen yhteistuotannossa on tutkittu Tenhunen diplomityössä. Hän on työssään keskittynyt pienten ja keskisuurten kaasumoottorien ja kaasuturbiinien yhdistämiseen absorptioon. Hänen mukaansa kaasumoottoreissa yksi suurempi rajoittava tekijä verrattuna kaasuturbiiniin on se, että lämpöä talteenotetaan moottorissa kahdessa vaiheessa moottorijäähdytyksestä ja savukaasuista. Kaasuturbiinissa lämpöä otetaan talteen vain savukaasuista. Moottorijäähdytyksestä tulevan veden lämpötila on liian alhainen hyödynnettäväksi absorptiossa. (Tenhunen 2014) Adsorption osalta voidaan käyttää hieman alhaisempia lämpötiloja, joten adsorption osalta kaasumoottorin vaippajäähdytyksen lämpö voisi olla käytettävissä.

Absorptiojäähdytys on käytössä kaukojäähdytykseen Helsingissä Helen Oy:n Salmisaaren laitoksella, jossa on yhteensä 10 absorptiojäähdytintä, jotka on otettu käyttöön vuosina 2001 – 2006. Adsorptiota ei käytetä tällä hetkellä kaukojäähdytyksen tuotantoon Suomessa. (Energiateollisuus ry 2018)

Adsorption käyttöä kaukojäähdytyksen tuottamiseen on tutkittu Salmen diplomityössä. Työn lähtöolettamana oli lämmön olevan ilmaista. Kaukokylmäverkkoa tutkituilla alueilla ei ollut olemassa, joten se olisi pitänyt rakentaa. Tehtyjen tarkastelujen mukaan adsorptiolla kaukokylmän tuotanto ei ollut kannattavaa. Kuitenkin esimerkiksi sähkön hinnan ja kaukokylmän hinnan vaikutus oli suuri laskennan tulokseen. (Salmi 2014)

### 5.4.5 Kylmän varastointi

Kylmän varastointiin voidaan käyttää varaajia eli niin sanottuja kylmäakkuja. Kylmäenergian huipputehon tarve on hyvin lyhytaikaista sekä vuotuisesti että vuorokausitasolla. Kylmäakkujen optimaalinen mitoitus on niin, että kolmasosa huipputehosta voidaan katataa kylmäakkujen avulla. Muulla laitteistolla katettavaksi jää kaksi kolmasosaa tehosta. Kylmäakuilla voidaan näin vähentää kylmäntuotannon laiteinvestoinnin tarvetta jopa kolmanneksella. Näin myös laitteiston huipunkäyttöaika nousee. (Salmi 2014)

Kylmäakkuja kaukojäähdytysjärjestelmissä on vuoden 2017 kaukojäähdytystilaston mukaisesti käytössä kolmella paikkakunnalla eli Espoossa, Helsingissä ja Turussa yhteensä 105,6 MW edestä. Helsingissä varastointitehoa on 63 MW, tuotantotehoa ja vapaajäähdytystehoa on käytössä yhteensä 177 MW. (Energiateollisuus ry 2018)

## 5.5 Esimerkkejä Suomesta pien-CHP:sta ja alueellisista energiaratkaisuista

Suomessa on tehty ja meneillään useita paikallisen energian tuotannon hankkeita. Suurin osa hankkeista liittyy lämmöntuotantoon. Pelkän lämmöntuotannon hankkeet on rajattu pois tästä tutkielmasta.

Tätä hanketta vastaavia monialaisia energiantuotannon ja -käytön yhdistäviä energiayhteisöhankeita on alkamassa ainakin Helsingin Kalasatamassa ja Vaasassa Wasa Station -hybridikorttelissa. Lisäksi yritysalueella Lempäälän Marjamäessä rakenteilla on energiayhteisö LEMENE, joka on lähtökohtana tähän uuteen energiayhteisöön ja jota on käsitelty tässä työssä luvussa 2.

LEMENE-hanke on yksi Työ- ja elinkeinoministeriön kärkihankkeista. Kärkihankerahoitusta ovat saaneet myös esimerkiksi Wasa Station -hybridikortteli sekä Nurmon Aurinko Oy:n aurinkosähkövoimalaitos.

Wasa Station -hybridikorttelissa useaa eri käyttäjäryhmää ja käyttötarkoitusta, kuten kauppakeskus, asuntoja, hotelli-ravintola, musiikki- ja kongressikeskus sekä urheilutilaa. Toimijana on Lemminkäinen Talo Oy. Wasa Stationin energiahankkeen ytimessä on korttelikohtainen energiaväylä ja energian kierrätys eri rakennusosien välillä. Koko energiakokonaisuus optimoidaan huomioiden vähäpäästöinen energiatuotanto, energian kulutus, huipputehojen leikkaus sekä energian varastointi ja kierrätys. Omaa energiantuotantoa tuotetaan aurinkokeräimillä 22 kW, aurinkopaneeleilla 400 kW ja maalämmöllä 550 kW.

Nurmon 6 MW aurinkovoimalaitos on Suomen suurin aurinkosähköhanke. Aurinkovoimalaitoksen lisäksi hankkeeseen kuuluu sisäinen älykäs sähköverkko, energiavarastointi ja kysyntäjousto.



Pien-CHP -hankkeista esimerkkialueena on Oulun Hiukkavaara, jossa yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto on toteutettu puuhakkeella. Oulun kohdetta on kehitetty ERA17- ja Resca-hankkeissa.

Espoon Finnoossa on Fiksu energia -voittaja-alue, jossa on toteutettu esimerkiksi alueella matalalämpöinen lämmönjako ja kulutushuippujen leikkaaminen etäohjauksella. Maalämpökaivojen asemasta käytetään hyväksi energiapaaluja, jolloin voidaan yhdistää rakennuksen paalutus ja maalämpölähde. Aurinkoenergian hyödyntämiseksi on luotu keskitettyjä aurinkosähköyhtiöitä, joiden aurinkopaneelit ovat esimerkiksi pysäköintilaitoksen katoilla. (ERA17, 2018)

Helsingissä kestävän rakennetun ympäristön kohteena Kalasatama on edelläkävijä. Fiksu Kalasatama -hankkeessa kehitetään ja käytetään hyväksi älykkäitä sähköverkkoja sekä aurinko- ja tuulienergiaa. Kalasatamaan tehdään muun muassa Pohjoismaiden suurin sähkövarasto, joka perustuu litiumakkuihin. (Helsingin kaupunki, 2018)

Pohjanmaan ELY:n rahoittamassa Energiaomavarainen seutu -hankkeessa on mukana lähinnä erilaisia pieniä hankkeita, kuten yksittäisten maatilojen biokaasulaitoksia. Jepuan kylän kehitteillä oleva älykkäiden mikroverkkojen kokeilupaikka kuuluu myös hankkeeseen. Jepuan kylällä on oma suljettu sähköverkko. Tavoite on tuottaa energiaa yli oman tarpeen käyttäen pienvesivoimaa ja biokaasua sekä mahdollisesti tuulivoimaa energianlähteenä.

## 6. JÄRJESTELMÄT JA MITOITUKSET

Tässä luvussa paneudutaan Lempäälän kuntakeskuksen korttelikohtaisen energiantuotannon järjestelmiin ja mitoituksiin. Ensimmäisenä tutkitaan nykyisen lämpölaitoksen lämpötilatasoja ja tehovaihtelua sekä määritellään lämpötilatasot korttelikohtaisen energiantuotannon matalalämpöiselle kaukolämmölle. Lähtökohtana energiankulutuksen tarkasteluissa on Lempäälä-talo ja sen kulutukset sekä pysäköintilaitos, jonka kulutuksia tarkastellaan erilaisilla sähköautolatauksien määrillä. Näiden avulla määritellään tavoitesähkönkulutus tuntitasolla.

Sähköenergia tuotetaan ensisijaisesti aurinkopaneeleilla ja toissijaisesti kaasumootorilla. Kaasumootorilla tuotetun sähkön sivutuotteena saadaan lämpöä. Lämpövirtojen osalta tutkitaan ensisijaisesti mahdollisuus käyttää lämpö Lempäälä-talossa. Yli jäävän lämmöntuotannon käyttöä muiden rakennusten lämmitykseen tutkitaan. Tätä varten tarkastellaan yhden nykyaikaisen esimerkkikerrostalon lämpöenergiankulutusta ja sen osalta tarvittavia kaukolämpövirtaamia.

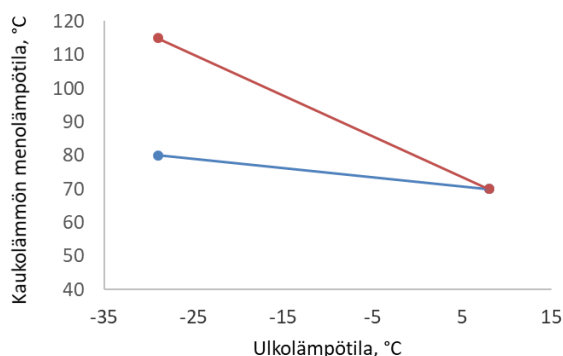
Kaukokylmän osalta tarkastellaan vaihtoehtoja keskuksen alueen kaukokylmän tuottamiseen. Kaukolämpö on tarkoitus tuottaa vapaajäähdytyksellä järvivettä hyödyntäen. Kesäaikana tarvitaan lisäjäähdytystä, joka tehdään nykyään kompressoriteknikalla.

### 6.1 Kaukolämpöverkon lämpötilatasot ja tehonvaihtelut

Lämpöenergiaa tuotetaan jo tällä hetkellä Lempäälän keskustan lämpölaitoksella. Lämpölaitokselta tuotetaan energiaa kaukolämpömitoituksella, jotka ovat Energiateollisuus ry:n julkaiseman Rakennusten kaukolämmitysohjeen ja -määräysten, julkaisu K1/2013, mukainen (myöhemmin K1-julkaisu) (Energiateollisuus ry 2014). Tässä työssä tarkasteltavassa korttelikohtaisessa energiantuotannossa lämpöenergia tuotetaan kaasumootoreilla sähköntuotannon sivutuotteena. Työssä käytetään määritelmää perinteinen kaukolämpöverkko tai kaukolämpöverkko tarkoittamaan K1-julkaisun ohjeen mukaan mitoitettua kaukolämpöverkkoa. Matalalämpöisemmällä kaukolämpöverkolla tai matalalämpöverkolla tässä työssä tarkoitetaan korttelikohtaisen energiantuotannon erillistä kaukolämpöverkkoa.

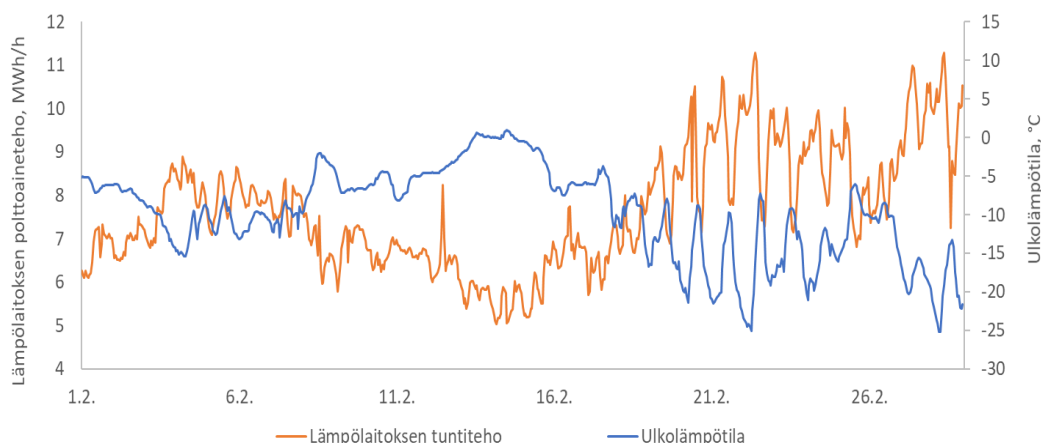
Kaukolämpöverkostossa lämpölaitokselta lähtevän vesivirran eli menoveden lämpötilaa ohjataan perinteisesti ulkolämpötilan perusteella. Kaukolämpöverkoston menovesi on lämpimintä ulkolämpötilan ollessa niin sanotussa mitoituslämpötilassa. Mitoituslämpötila annetaan kaukolämmityksen K1-julkaisussa. Tampereen seudulla mitoitusulkolämpötila on  $-29\text{ °C}$ . Tällöin kaukolämpöjärjestelmässä menoveden lämpötila on  $115\text{ °C}$ . (Energiateollisuus ry 2014) Kaasumootorissa vesi lämpiää enintään noin  $90\text{ °C}$  lämpötilaan. Koska lämpöverkostossa on häviöitä, asiakkaalle luvattu lämpötilatason pitää olla

tätä alempi. Siksi matalalämpöjärjestelmässä rakennuksen kaukolämmön menoveden lämpötila on enintään 80 °C. Matalimmillaan rakennukseen tuleva kaukolämpöveden lämpötila voi olla 70 °C järjestelmästä riippumatta, koska käyttöveden lämmitys vaatii tämän minimilämpötilan. Kaukolämmön menoveden säätökäyrä eli menoveden lämpötila ulkoilman lämpötilan funktiona on esitetty kuvassa 9.



**Kuva 9** Kaukolämmön menoveden säätökäyrä. Punainen säätökäyrä on perinteiselle kaukolämpöverkolle. Sininen säätökäyrä on matalalämpöiselle kaukolämpöverkolle.

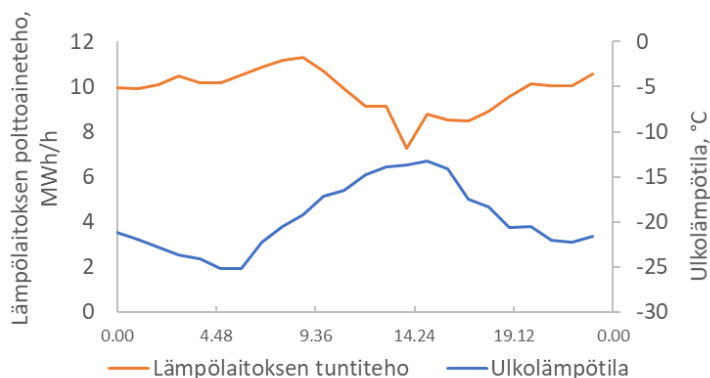
Olemassa olevan kaukolämpöverkon tehonvaihteluja voidaan tutkia käyttämällä hyväksi kattilakohtaisesti mitattua kaasun kulutusta. Kaasun kulutuslukemat kirjautuvat kulutus-seurantaan tunnin välein. Kaasun kulutuksesta saadaan laskettua tuntikohtainen keskiarvo polttoainetehosta. Kuvassa 10 on esitettyä helmikuun 2018 aikainen polttoainetehon vaihtelu Lempäälän keskustan lämpölaitoksessa. Teho vaihtelee välillä 5,0 - 11,3 MWh/h lämpötilan vaihdellessa välillä -25,2 - +1 °C. Tehon vaihtelu seuraa lämpötilaa.



**Kuva 10** Lempäälän keskustan olemassa olevan lämpölaitoksen polttoaineteho ja ulkolämpötila helmikuussa 2018.

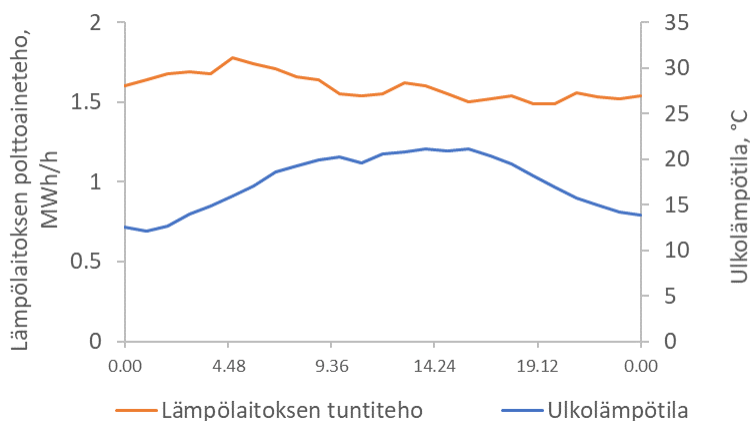
Kuitenkin on huomattava, että lämmitysteho nousee aamuisin, vaikka ulkolämpötila on jo nousussa. Kuvassa 11 on esitettyä polttoaineteho ja ulkolämpötila 28.2.2018. Ky-

seessä on keskiviikko ja siten tyypillinen arkipäivä. Kevättalven ollessa kyseessä lämpötilavaihtelut päivän aikana ovat voimakkaat. Ulkolämpötila alkaa nousta jo kello 6 lähtien. Johtuen aamun lisääntyneestä lämmöntarpeesta niin ilmanvaihdon kuin käyttöveden osalta lämpölaitoksen tuottama teho nousee vielä kello 9 saakka. Arkisin kaukolämmön suurin kulutus talven pakkaspäivinä on yleensä kello 7 ja 9 välillä.



**Kuva 11** Lempäälän keskustan olemassa olevan lämpölaitoksen polttoaineteho ja ulkolämpötila talviarkipäivänä.

Kesällä kaukolämpötehon tarve on pienimmillään. Silloin kaukolämpöä tarvitaan lähinnä käyttöveden lämmitykseen sekä verkostohäviöiden kompensointiin. Kuvassa 12 on esitettyinä lämpölaitoksen polttoaineteho kesäisenä perjantaina 30.6.2017. Kesäpäivänä kulutus on tasaisempaa, eikä esiinny aamuista piikkiä kulutuksessa kuten talvella.



**Kuva 12** Lempäälän keskustan olemassa olevan lämpölaitoksen polttoaineteho ja ulkolämpötila kesäarkipäivänä.

## 6.2 Lämmitysenergian kulutus ja verkostot rakennuksissa

Tässä luvussa käsitellään Lempäälä-talon ja esimerkkikerrostalon lämpöenergian kulu-  
tusta. Lämpöenergian mallinnetun tuntitasoisen kulutuksen avulla päästään laskemaan ra-  
kennuksen eri lämmitysverkostojen ensiö- ja toisiopuolen virtaamia.

### 6.2.1 Lempäälä-talon lämmitysverkostot

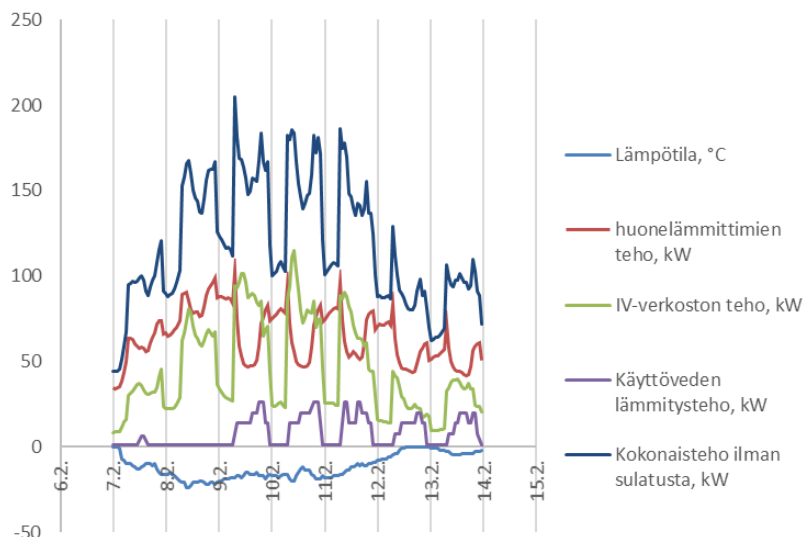
Lempäälä-talon ja pysäköintilaitoksen sähkö- ja lämpöenergiankulutus on mallinnettu  
tuntitasoisesti dynaamisella laskentaohjelmalla IDAICE kohteen elinkaarisuunnittelijan  
Sweco Talotekniikka Oy:n toimesta. Lämpöenergian osalta on eroteltu ilmanvaihdon vaa-  
tima lämpöenergia ja huonelämmittimien vaatima lämpöenergia sekä käyttöveden läm-  
mityksen vaatima teho tunnin keskiarvoina. Lempäälä-talon yhteydessä olevan kevyen-  
liikenteen reitin sekä sisäänkäyntien edustojen ja ajoluiskien liuoslämmitteisen sulanapi-  
tojärjestelmän tuntiset keskitehot on laskettu erikseen tätä työtä varten hyödyntäen ASH-  
RAE:n tuottamaa IWEC2-säädataa kohteelle Tampere-Pirkkala lämpötilojen osalta sekä  
vuoden 2016 Tampere-Pirkkalan lumisadedataa (Ilmatieteenlaitos 2019). Koska lunta  
yleensä sataa lämpötilan ollessa yli  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja runsaammin lämpötilan ollessa lähempänä  
nollaa, osa lumisateista on siirretty aineistossa tarkastelua varten sopivaan lämpötila-alu-  
eseen.

Lämpöverkoston tehontarve vaihtelee voimakkaasti vuorokauden aikana. Tehontarpeen  
vaihtelu korostuu kylmillä ilmoilla. Kuvassa 13 on esitetty mallinnetun helmikuisen kyl-  
män viikon lämpöverkoston energiantarvetta Lempäälä-talossa. Koska käytetty IWEC2-  
säädata on energialaskentaa varten luotu data, eivät päivät edusta mitään todellista ajan-  
kohtaa. Ulkoalueiden sulanapitoverkostoa ei ole mukana tässä tarkastelussa. Ilmanvaiht-  
toverkoston energiantarve on pienimmillään yöaikaan, jolloin ilmanvaihtokoneet käyvät  
osateholla. Ilmanvaihtokoneiden ilmamäärät ovat tarveohjattuja eli ilmamäärää säädetään  
huone- ja aluekohtaisesti esimerkiksi hiilidioksidiantureiden ja läsnäolotunnistimien  
avulla. Tästä syystä todellinen ilmanvaihtomäärä ja sitä kautta tehontarve riippuvat käy-  
töstä ja siten voivat poiketa mallinnetusta. Yleensä kuitenkin suurin ilmanvaihdon läm-  
mitysteho tarvitaan aamulla, koska silloin on sekä rakennuksella käyttöä että ulkolämpö-  
tila matala. Samoin käyttövesiverkosto vaatii enemmän lämmitysenergiaa käyttöaikaan.

Huonelämmittimiä esimerkkikohteessa Lempäälä-talossa ovat lämmityspatterit ja katto-  
säteilijät. Ilmanvaihtojärjestelmästä poiketen huonelämmittimien suurin tehontarve on  
yöaikaan. Päiväaikaan arkipäivinä kuvaajassa nähdään suuri tehontarpeen alenema huo-  
nelämmittimien verkostoissa. Tämä johtuu ulkolämpötilasta ja päiväaikaaisista lämpö-  
kuormista, jotka tulevat laitteista, ihmisistä ja auringosta.

Huomattavaa kuitenkin on, että sekä huonelämmittimien että ilmanvaihdon suurin tehon  
tarve on aamulla samaan aikaan. Tämä tehopiikki ilmaantuu samaan aikaan kuin aiemmin

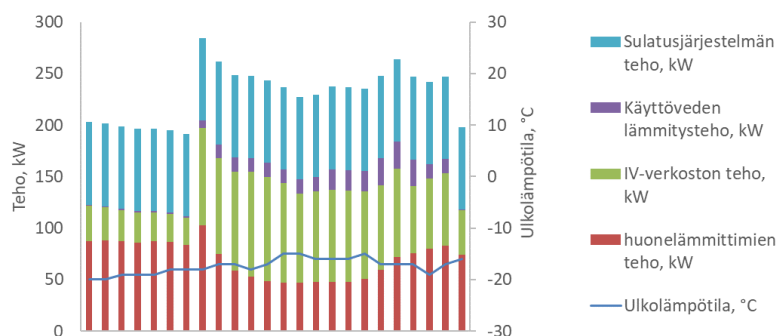
lämpölaitostarkastelussa esiin tullut nykyisen kaukolämpöverkon tehopiikki. Toinen tehopiikki lämmitysenergian tarpeessa toistuu illalla, kun ulkolämpötila hieman laskee ja lämpökuormat ovat poistuneet rakennuksesta, mutta ilmanvaihto vielä huuhtelee suuremalla teholla rakennusta.



**Kuva 13.** Lempäälä-talon lämmitysverkostojen, pois lukien sulanapitoverkosto, tehot ja ulkolämpötila helmikuisena pakkasviikkona (sunnuntai-lauantai). Kuvaajassa pystysuorat viivat ovat vuorokauden vaihtumisen kohdalla.

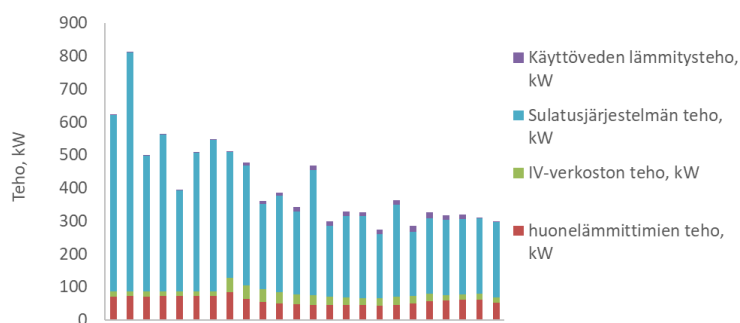
Kun yhdistetään huonelämmittimien verkostojen eli kattosäteilijä- ja patteriverkostojen, ilmanvaihtoverkoston ja lämpimän käyttöveden verkoston tuntiset mallinnetut lämpötehot saadaan kaukolämmön tuntinen keskiteho ilman sulanapitojärjestelmää. Lämpimän käyttöveden tehontarve vaihtelee hetkellisesti paljon.

Kuvassa 14 on esitettyä yhden talvisen pakkaspäivän osalta tehojen jakauma, kun huomioidaan myös sulanapitojärjestelmän teho. Esimerkkipäivänä ulkolämpötila on noin -20°C ja on poutaa. Tällöin sulanapitojärjestelmä on minimiteholla, jolloin sulanapidettävää aluetta ei lämmitetä, pidetään vain järjestelmän glykolineste sulana.



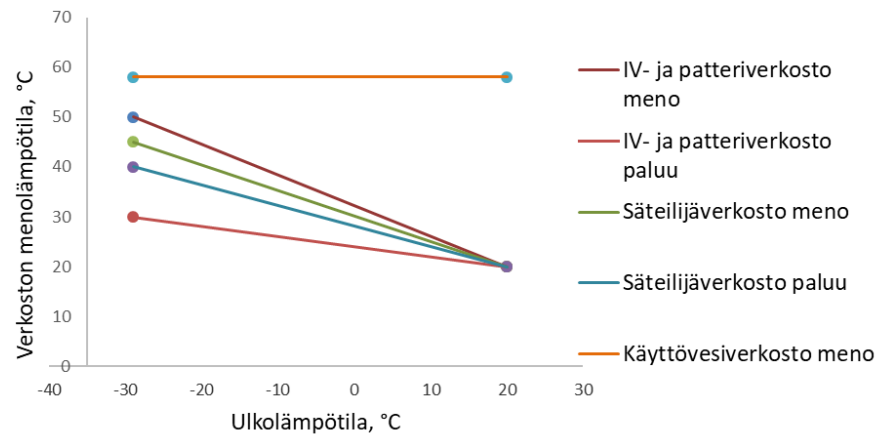
**Kuva 14.** Lämmitystehojen vaihtelu Lempäälä-talossa helmikuisena pakkaspäivänä arkena, kun pakkasta on noin -20 °C. Sulanapitojärjestelmä on ylläpitoteholla, koska ulkolämpötila on alle -15 °C.

Kuvassa 15 on esitettyä helmikuisen lumisadepäivänä Lempäälä-talossa tarvittavan lämmitystehon vaihtelu. Esimerkkipäivänä ulkolämpötila nousee vuorokauden aikana -8 °C:sta 0 °C lämpötilaan. Lunta sataa yöstä alkuiltaan kello 18 saakka. Yhteensä sademäärä on 9 mm vedeksi muutettuna, joka tarkoittaa noin 9 cm lumikertymää. Sateen jälkeen sulanapitojärjestelmän energiaa kuluu edelleen lämpöhäviöinä ympäristöön.



**Kuva 15** Lämmityksen tuntitehojen vaihtelu helmikuisena lumisadepäivänä Lempäälä-talossa. Sateen ja lumensulatuksen aikana sulatusjärjestelmä vaatii huomattavasti enemmän tehoa kuin rakennuksen muu lämmitys.

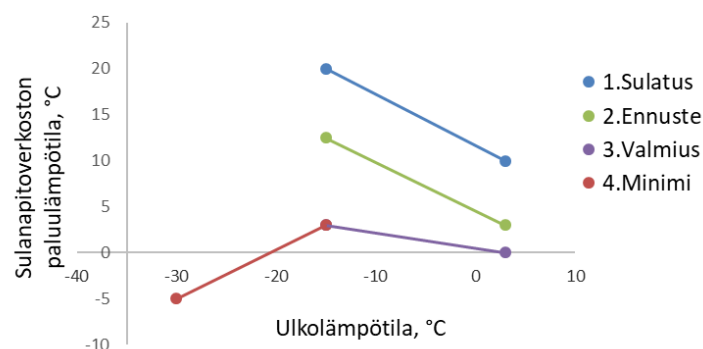
Kuten aiemmin luvussa 4 Energiankulutus rakennuksissa käytiin läpi, rakennuksen eri lämmitysjärjestelmille on omat lämmitysverkostonsa. Lempäälä-talossa on toimistojen ja liiketilojen lämmitys hoidettu lämpösäteilijöillä. Kirjasto-osassa on patterilämmitys. Vesikiertoisia lattialämmityksiä ei Lempäälä-talossa ole. Lämpösäteilijöille on oma verkostonsa. Lempäälä-talossa on ilmanvaihtoverkosto mitoitettu jonkin verran matalammalla lämpötilalla K1-julkaisun (Energiateollisuus ry 2014) vaatimuksiin verrattuna, koska tässä kohteessa varaudutaan matalalämpöisemmän kaukolämmön käyttöön. Normaaliala matalalämpöisempi ilmanvaihtoverkosto mahdollistaa myös erilaisten hukkalämpöjen käytön. Koska ilmanvaihtoverkoston lämpötilataso on normaalia matalampi, on kohteessa voitu yhdistää patteri- ja ilmanvaihtoverkostot. Lempäälä-talon lämpöverkostojen menolämpötilojen säätökäyrät on esitetty kuvassa 16.



**Kuva 16** Rakennuksessa käytetyt säätökäyrät menolämpötiloille toisiopuolen lämmitysverkostoille.

Sulanapitojärjestelmää ohjataan Lempäälä-talossa kuvan 17 mukaisella säätökäyrällä. Sulanapitoverkoston lähtevälle lämpötilalle on tässä tapauksessa kolmesta neljään eri ohjausta eri käyttötilanteita varten:

1. Sulatus, jota käytetään lumisateen aikana.
2. Ennuste, jota käytetään, kun sääennuste ennustaa lumisadetta esimerkiksi yli 50 % todennäköisyydellä. Tämä ohjaustapa on optiona. Sääennustekäyttö vaatii sääennustepalvelun liittämisen rakennusautomaatioon.
3. Valmius, jota käytetään sateettomana aikana, kun lämpötila ulkona on välillä  $-15\text{ °C} - +2\text{ °C}$ .
4. Minimi, jota käytetään, kun ulkolämpötila on alle  $-15\text{ °C}$ .



**Kuva 17** Ulkoalueiden sulanapitoverkoston esimerkkisäätökäyrä eri käyttötilanteissa. Muokattu Lempäälä-talon yleissuunnitteluvaiheen rakennusautomaatiosuunnitelman säätökaaviosta.

Ulkoalueiden sulanapitoverkosto on päällä vain talviaikaan. Tämän työn laskelmissa oletettu vuosittainen käyttöaika on marraskuun alusta maaliskuun loppuun. Tämän lisäksi



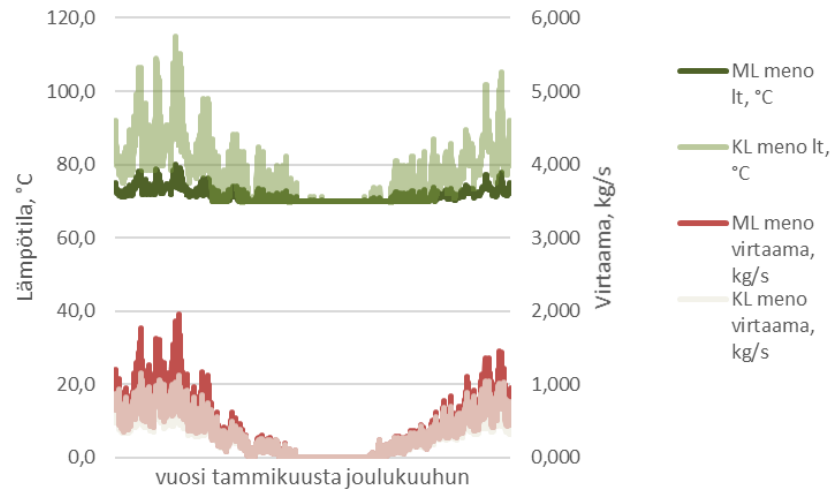
talviaikana ulkolämpötilan ollessa yli +2 °C, sulanapitojärjestelmä kytkeytyy poissatila-asetukseen. Poissatila-asetuksessa sulanapitojärjestelmää ei lämmitetä. Pumpputa käyttäen kuitenkin esimerkiksi kerran vuorokaudessa lyhyen aikaa.

Tätä työtä varten tehdyissä laskelmissa ei ole huomioitu sulanapitojärjestelmän ennustekäyttöä. Ennustekäyttö lisää jonkin verran energiankulutusta. Ennustekäytöllä sulanapitoa voidaan ennakoida ja näin saadaan ulkoalueiden kunnossapidon laatua nostettua.

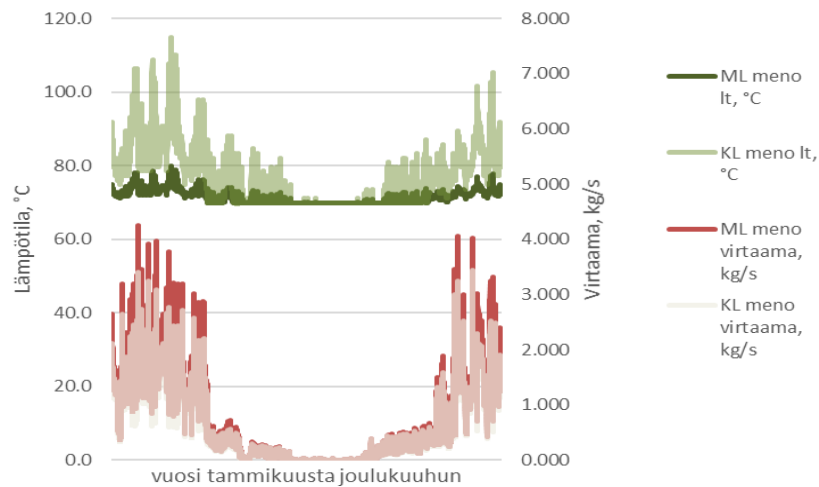
Sulanapitojärjestelmässä ensiöpuolella käytetään ensisijaisesti rakennuksen muiden lämmönvaihtimien lämmönvaihtimista palaavaa kaukolämpöä. Kaukolämpöä voi jäähtyä sulanapidon lämmönvaihtimessa enintään +10 °C lämpötilaan, jotta vältetään mahdollisilta jäätymisongelmilta. Jos tämän muista lämmönvaihtimista palaavan veden energiasäilytys ei riitä, tarvitaan lisäystä kaukolämmön menovedestä.

Kun tiedetään ulkolämpötila ja sitä kautta eri lämmitysverkostojen veden lämpötilat sekä tarvittavat tehot ja palaavan veden lämpötilat, voidaan laskea kaukolämpövesivirta. Lämmönsiirtimen ensiöpuolella kiertää kaukolämpöä ja toisiopuolella rakennuksen lämmönvaihtimien vesi tai muu neste. Lämmönsiirtimen asteisuudella ilmaistaan lämmönsiirtimestä palaavan ensiöpuolen nesteen ja toisiopuolelle menevän nesteen lämpötilan eroa. Lämmönsiirtimen asteisuudeksi on laskelmissa käytetty 5,0 °C sulanapitoverkostossa ja K1-julkaisun ohjeen mukainen 3,0 °C muissa lämmitysverkostoissa. Käyttövesiverkoston osalta lämmönsiirtimen asteisuutena on käytetty 10,0 °C. Käyttövesiverkostosta palaavaa vettä ei johdeta sulanapidon lämmönsiirtimen ensiöpuolelle lämpötilan alhaisuuden vuoksi. Kuvassa 18 ja 19 on esitetty Lempäälä-taloon tulevat mallinnettujen energiankulutusten mukaiset kaukolämpövesivirrat ja -lämpötilat sekä matalalämpöiselle että perinteiselle kaukolämpöjärjestelmälle. Kuvassa 18 ei ole huomioitu sulanapitojärjestelmää, kun taas kuvassa 19 esitetään virtaamat silloin, kun sulanapitojärjestelmä on laskettu mukaan virtaamiin. Koska matalalämpöjärjestelmässä on vain pienet vaihtelut kaukolämmön menoveden lämpötilalle, virtaamien vaihtelu kesä- ja talviolosuhteiden välillä on huomattavasti suurempaa kuin perinteisessä kaukolämpöverkostossa. Tästä syystä matalalämpöinen kaukolämpöverkko vaatii suuremmat putkikoot ja investointi on tätä kautta kalliimpi.

Kuvasta 19 voidaan nähdä, että sulanapitojärjestelmä lisää huomattavasti tarvittavaa tehoa ja sitä kautta virtaamia. Koska lämmönsiirtimekset mitoitetaan kaukolämpömääräysten K1-julkaisun mukaisesti paluulämpötilan osalta niin, että paluulämpötila ei saa ylittää 33 °C, matalalämpöjärjestelmässä lämmönvaihtimessa ensiöpuolen jäähtymä on pienempi ja sitä kautta virtaama isompi. Koska virtaamaa on enemmän, saadaan rakennuksesta poistuvasta paluuvirtaamasta enemmän energiaa sulanapitojärjestelmän käyttöön. Siten matalalämpöjärjestelmässä kaukolämpövirtaamien lisäys sulanapitojärjestelmän vuoksi ei ole yhtä suurta kuin perinteisessä kaukolämpöjärjestelmässä.



**Kuva 18.** Kaukolämmön menoveden lämpötila ja virtaama vuoden ajalta Lempäälä-talossa, kun sulatusjärjestelmää ei ole huomioitu. Kuvassa ML tarkoittaa matalalämpöistä kaukolämpöä ja KL perinteistä kaukolämpöä.



**Kuva 19.** Kaukolämmön menoveden lämpötila ja virtaama vuoden ajalta Lempäälä-talossa, kun sulatusjärjestelmä on huomioitu tehontarpeessa. Kuvassa ML tarkoittaa matalalämpöistä kaukolämpöä ja KL perinteistä kaukolämpöä.

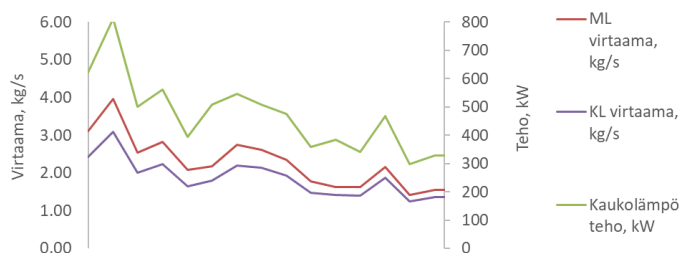
Sulanapitojärjestelmä kuluttaa energiaa enemmän lumisateen aikana ja heti sen jälkeen. Sulanapitojärjestelmä kuluttaa lämmitysenergiaa talviaikaan muuna aikana ylläpitolämmön tai minimilämmön verran. Ylläpitolämpötilaa käytetään yli  $-15^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa ja sen tarkoitus on pitää väylät sulana sateettomana aikana. Minimilämpötilaa ylläpidetään alle  $-15^{\circ}\text{C}$  ulkolämpötilassa ja sen tarkoituksena on pitää vain sulanapitoverkoston liuos

juoksevana. Ylläpitolämmön ja minimilämmön aikana sulanapitoputkistossa olevan nesteen lämpötilaa pudotetaan. Tämä mahdollistaa myös suuremman jäähtymän kaukolämpövedelle. Palaavan kaukolämpöveden ei kuitenkaan anneta laskea alle  $+10^{\circ}\text{C}$  lämpötilan, jotta ei tule putkistoissa tai vaihtimissa jäätymisongelmia.

Sulanapidon verkoston lämpöhäviölaskelmissa tässä esimerkkitapauksessa on arvioitu maahan ja ympäristöön suuntautuvat lämpöhäviöt. Kun sulanapitoputkiston alla on hyvät eristeet, alla olevaan maahan suuntautuva lämpöhäviö on noin  $20 \text{ W/m}^2$ . Kun sulanapitoputkisto on kansirakenteen päällä ja alla on kylmää tilaa, lämpöhäviö on noin  $50 \text{ W/m}^2$  suurempi. Lempäälä-talon sulanapidon putkistosta noin 25 % on kansirakenteen päällä. Osa putkistosta on lämpimän rakenteen päällä. Tästä on arvioitu ja laskelmissa käytetty maahan suuntautuvan lämpöhäviön arvona  $35 \text{ W/m}^2$  sulatustilanteessa. Järjestelmän ollessa valmiustilassa putken lämpötila on huomattavasti alhaisempi. Siksi maahan suuntautuva lämpöhäviö on tällöin pieni ja rakenteessa, jossa lämmin tila on alla, lämpöhäviö on negatiivinen. Tästä syystä valmiustilassa on keskimääräinen lämpöhäviö putkista alaspäin jätetty huomiotta näissä laskelmissa. Ympäristöön suuntautuvissa lämpöhäviöissä on käytetty arviona noin  $15 \text{ W/m}^2\text{K}$  lämmönsiirtokerrointa. Käyttötilanteessa sateen aikana putken lämpötila on korkeampi ja sitä kautta lämmönsiirto olisi lumettomalta pinnalta suurempaa ympäristöön, mutta päällä oleva lumi toimii eristeenä estäen lämpöhäviötä ympäristöön. On kuitenkin tilanteita, jossa sulanapito on sulatusohjauksella, mutta lumi on jo päältä sulanut. Tällöin lämpöä siirtyy suuremman lämpötilaeron vuoksi noin kaksinkertainen määrä ympäristöön. Näissä laskelmissa on oletettu, että sulatusohjauksella ympäristöön siirtyy puolet siitä lämpömäärästä kuin ylläpitoasetuksella. Ylläpitoasetuksella laskelmissa on käytetty ympäristöön siirtyvästä lämmöstä olettamusta, että  $0^{\circ}\text{C}$  lämpöhäviö on  $100 \text{ W/m}^2$  ja  $-15^{\circ}\text{C}$   $310 \text{ W/m}^2$ . Alle  $-15^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa sulanapitojärjestelmä ohjataan minimiasetukselle. Tällöin nostetaan lämmönsiirtimessä liuoksen lämpötilaa  $2^{\circ}\text{C}$ , joka on 10 % lämpötilaerosta mitoitusilanteessa. Joten tällöin myös tarvittava lämpöteho samalla virtaamalla on 10 % mitoitustehosta.

Sulanapitoverkoston lämpötilatason vuoksi valmius- ja minimilämpöön voidaan käyttää enemmän rakennuksesta palaavan kaukolämpöveden lämpöenergiaa. Sateen alkaessa tai, jos käytetään sääennusteisiin perustuvaa ennakoivaa säätöä, jo ennen sadetta, automaatio nostaa sulanapitojärjestelmästä palaavan liuoksen lämpötilaa. Suurempi paluuv veden lämpötila ja sitä kautta pienempi kaukolämmön jäähtymä vaativat myös suurempaa kaukolämmön virtausta.

Edellä tarkasteltiin lumisadepäivän energiankulutuksen jakaumaa Lempäälä-talossa. Kuvassa 20 on samalta ajankohdalta kaukolämpövirtaamat koko rakennuksessa niin perinteisessä kaukolämpöverkossa (KL) kuin matalalämpöisessä kaukolämpöverkossa (ML). Matalalämpöverkossa virtaamat ovat jonkin verran suurempia kuin perinteisessä kaukolämpöverkossa. Virtaamien ero on suurempi, kun sataa ja ulkolämpötila on alempi. Tarkastelupäivän illalla on sateetonta ja lämpötila noin  $0^{\circ}\text{C}$ . Tällöin virtaamien ero perinteisen kaukolämpöverkon ja matalalämpöisen kaukolämpöverkon välillä on pieni.



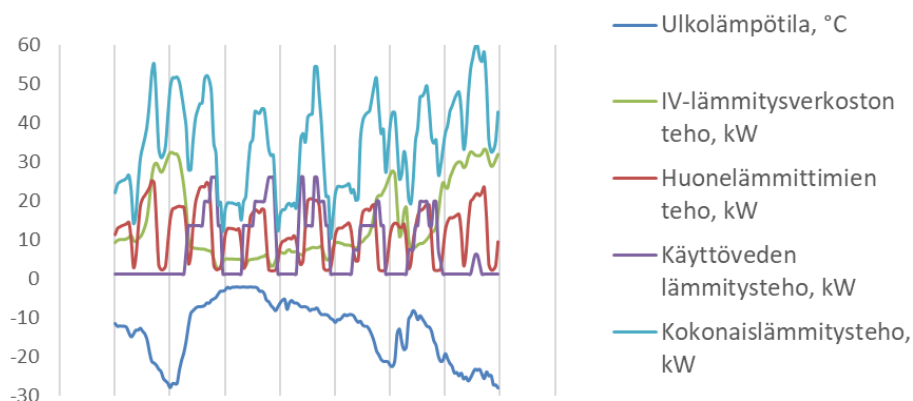
**Kuva 20** Lempäälä-talon kaukolämpöteho ja -virtaamat perinteisessä kaukolämpöverkossa (KL) ja matalalämpöisessä kaukolämpöverkossa (ML) lumisadepäivänä.

Sulanapitojärjestelmän energiankulutus on keskeinen tekijä kokonaiskulutuksen ja -virtaamien kannalta. Näiden laskelmien mukaan sulanapitojärjestelmä kuluttaa energiaa 1 035 MWh vuodessa. Rakennuksesta palaavasta kaukolämpövedestä saadaan perinteisessä kaukolämpöverkossa 151 MWh (14,6 %) ja matalalämpöisessä kaukolämpöverkossa 188 MWh (18,1 %) energiaa talteen vuodessa. Loppu lämmitysenergia otetaan kaukolämmön menovedestä.

## 6.2.2 Asuinkerrostalojen tehontarpeet ja lämpövirrat

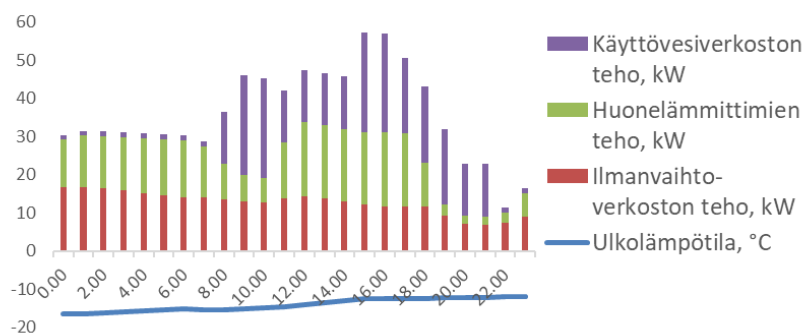
Kuten luvussa 2 kerrottiin, Lempäälän kuntakeskukseen on tulossa huomattavasti uusia asuinkerrostaloja. Osa kerrostaloista tulee suunnitelmien mukaan sijaitsemaan hyvin lähellä lämpölaitosta ja korttelikohtaista energiantuotantoa. Lähimpien kerrostalojen lämmityksessä voidaan hyödyntää erillistä matalalämpöverkostoa käyttäen korttelikohtaisessa energiantuotannossa mahdollisesti yli jäävää lämpöenergiaa.

Asuinkerrostalon osalta tarkastellaan esimerkikerrostalon lämmitykseen tarvittavaa tehoa ja tarvittavia kaukolämpövirtaamia. Kulutustiedot ovat suunnitteluvaiheessa olevan kerrostalon tuntipohjaisesta energialaskennasta. Energialaskenta on tehty IDA ICE -ohjelmalla. Kohde sijaitsee Oulussa, joten tämän osalta myös kaukolämpövirtaamien laske- misessa on käytetty IWEC2 Oulun säädettä. Esimerkkikerrostalossa ei ole muita huoneistoja kuin asuntoja. Tuntitasoiset energialaskentatiedot on saatu käytettäväksi Sweco Talotekniikka Oy:ltä tätä työtä varten.



**Kuva 21** Uuden kerrostalon mallinnetut lämmitysverkostojen tehot ja ulkolämpötila tammikuisena pakkasviikkona (sunnuntai- lauantai). Kuvaajassa pystysuorat viivat ovat vuorokauden vaihtumisen kohdalla.

Kuvassa 21 on esitettyä esimerkikerrostalon lämmitysverkostojen tehot tuntikeskiarvoina tammikuisena pakkasviikkona. Ulkolämpötilan nousu vaikuttaa selvästi tarvittavaan pohjatehoon. Huonelämmittimien tehoissa huomataan lämpökuormien vaikutus aamuisin ja iltaisin. Huoneistoissa tulee lämpökuormia erilaisista sähkölaitteista, esimerkiksi elektroniikkalaitteista, uunista, liesistä ja saunoista. Nämä lämpökuormat vähentävät huonelämmittimistä tarvittavaa tehoa. Käyttöveden tehontarve on suurimmillaan tässä mallissa arkisin illalla noin kello 21. Todellisuudessa veden käyttöön vaikuttaa paljon asukkaat ja heidän kulutustottumuksensa. Keskimääräinen vedenkulutus kerrostaloissa on 155 l/asukas/vrk. Noin 40 % vedenkulutuksesta asuinrakennuksissa on lämmintä vettä. Motivan selvittämissä kohteissa kulutus vaihteli välillä 70 ja 450 l/asukas/vrk. (Motiva 2019)



**Kuva 22** Lämmitystehojen vaihtelu esimerkikerrostalossa helmikuisena pakkaspäivänä arkena.

Kuvassa 22 on kuvattuna esimerkikerrostalon lämpötehon tarve tyypillisenä helmikuisena arkipakkaspäivänä. Lämmitystehon kokonaistarve vaihtelee vuorokauden aikana välillä 11 – 57 kW. Ilmanvaihdon tarvitsema lämmitysteho on suoraan suhteessa ulkoilman

lämpötilaan. Ilmanvaihtoverkoston tehontarve vaihtelee välillä 7 – 17 kW. Yöllä ja keskipäivällä tarvitaan eniten huonelämmittimien tehoa, kun taas lämpökuormien vaikutuksesta illalla lämmittimien tehoa tarvitaan vain vähän. Huonelämmittimien yhteenlaskettu tehontarve vaihtelee välillä 2 – 20 kW. Käyttöveden lämmittämisen keskitehontarve tuntia kohti vaihtelee välillä 1 – 26 kW. On kuitenkin huomioitava, että käyttöveden hetkellinen tehontarve vaihtelee nopeasti ja paljon. Käyttöveden lämmityksen enimmäistehontarve määritellään aina käyttäen mitoitusvirtaamia.

### 6.3 Lempäälä-talon ja pysäköintilaitosten sähkönkulutus

Lempäälä-talon sähkönkäyttö on mallinnettu kohteen elinkaarikonsultin Sweco talotekniikka Oy:n toimesta. Näissä tarkasteluissa on käytetty yleissuunnitteluvaiheen laskelmia. Koska yleissuunnitteluvaiheessa suunnitelmat ovat alustavia eikä laitteita ja järjestelmiä ole vielä lopullisesti valittu, ovat laskelmat vielä karkeita arvioita. Lisäksi energialaskennassa on tarkasteltu aurinkopaneelien tuottoa. Aurinkopaneeleita on laskennassa sijoitettuna toimisto-osan katolle. Kattopinta-alaa on käytössä paneeleita varten 550 m<sup>2</sup>. Kuvassa 23 on esitetty vuoden energiankäyttö ja aurinkopaneelien energiantuotto. Suunniteltu aurinkosähköjärjestelmä tuottaa 65 MWh sähköä vuodessa. Tämä kattaa noin 10 % Lempäälä-talon vuotuisesta sähköenergiantarpeesta. Aurinkopaneelien sähköntuotto käytetään lähes kokonaan kohteessa. Ylituotantoa tulee pieniä määriä vain muutama kesäpäivänä.



**Kuva 23** Lempäälä-talon sähkönkulutus ja suunniteltujen aurinkopaneelien sähköntuotto.

Tämän lisäksi sähköä kuluu pysäköintilaitoksessa autojen lämmitykseen ja sähköautojen lataamiseen. Sähköautopaikkoja on rakentamisvaiheessa tulossa 2 kappaletta. Näillä ei juurikaan ole vaikutusta kokonaissähkönkäyttöön. Rakennusvaiheessa kuitenkin varaudutaan kaikkien 150 lämmityspistokkeellisen paikan muuttamiseen autolatauspaikoiksi tulevaisuudessa. Tulevaisuudessa saattaakin autojen lataus muodostua merkittäväksi tekijäksi sähkönkäytössä. Lempäälä-taloon on suunnitteilla niin sanottuja peruslataus- eli

normaalilatauspistokkeita. Näitä kutsutaan myös nimityksellä keskinopea lataus. Tällaisten latauspisteiden teho on 3,4-22 kW. Lempäälä-talossa on suunniteltu käytettäväksi enintään 3,7 kW latauspistokkeita.

Sähkölatauksen lisääntymisen vaikutusta tehonlisäykseen voidaan hallita käyttämällä älykästä ohjausta. Sähköautojen akkulatausta varten on olemassa sähkönsyötön ohjausjärjestelmiä, joilla voidaan tasoittaa kulutuspiikkejä ja saadaan tasavertainen akun lataaminen kaikille autoille.

Tässä työssä on käytetty taulukossa 3 esitettyä jakaumaa sähköautojen lataukselle. Käytetyllä jakaumalla oletukseksi tulee, että jokaisella latauspaikalla on keskimäärin 4,6 tuntia päivässä täysi latausteho käytössä. Kohteessa on sekä työpaikka-, asiakas- että asukaspysäköintiä. Työpaikka- ja asukaspysäköinnin vuoksi sähkölatauksen on oletettu painottuvan päiväaikaan. Asukaspysäköinnin vuoksi myös ilta-aikainen lataus on huomioitu. Laskelmissa on oletettu akustojen käyttö sähkövarastoina, joten tämän työn tuloksiin ei vuorokausijakaumalla ole juurikaan merkitystä. Merkitystä on päivittäisellä latausenergian tarpeella.

**Taulukko 3.** Tämän työn laskelmissa käytetty jakauma sähköautojen latauspaikkojen käyttöasteille tunneittain.

Kello	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00
Käyttöaste	1 %	10 %	10 %	30 %	30 %	30 %	25 %	25 %	25 %	30 %	30 %	30 %

Kello	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Käyttöaste	30 %	30 %	30 %	20 %	20 %	20 %	10 %	10 %	5 %	2 %	1 %	1 %

## 6.4 Korttelikohtainen energiantuotanto

Korttelikohtaiseen energiantuotantoon kuuluvat aurinkopaneelit, kaasumoottorit ja akus-  
tot. Tässä työssä keskitytään kaasumoottorin sähkön- ja lämmöntuotantoon sekä virtaa-  
mien mitoittamiseen. Energiantuotannon mitoituksen lähtökohtana on energiankulutusar-  
viot, joita on käsitelty luvuissa 6.2 ja 6.3. Aurinkopaneelien osalta ensimmäisessä vai-  
heessa suunnitellut Lempäälä-talon aurinkopaneelit on käsitelty luvussa 6.3. Myöhem-  
mässä vaiheessa aurinkopaneeleja on ehkä mahdollisuus lisätä, mutta niitä ei tässä työssä  
ole huomioitu mitoituksissa. Sähköakustoja ei tässä työssä mitoiteta. Akkuja oletetaan  
olevan käytössä tarvittava määrä sähkön varastoimiseksi ja sähköenergiaa voidaan näin  
tuottaa seuraavan 24 tunnin tarpeisiin varastoon. Kun sähköautot yleistyvät, osana tarvit-  
tavaa akkukapasiteettia voidaan hyödyntää latauksessa olevien sähköautojen akkukapa-  
siteettia.

Lisäksi tässä luvussa käsitellään kaukokylmän tuotantoa sekä energiavarastoja. Kaukokylmän osalta käsitellään eri vaihtoehtoja, mutta järjestelmän mitoitusta ei tässä yhteydessä tehdä.

### 6.4.1 Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto kaasumoottorilla

Sähköntuotannon mitoituksen lähtökohtana on sähköenergian tarve Lempäälä-talossa sekä pysäköintilaitoksissa. Sähköenergian tarve määrittelee kaasumoottorin käytön. Lämmöntuotanto kaasumoottorissa on sähköntuotannon hukkalämpöä. Lämpöä otetaan talteen moottorijäähtytyksestä ja savukaasuista. Kuten jo aiemmin on todettu, kaasumoottorin minimikäyttöteho on noin 40 % nimellistehosta. Joten näissä laskelmissa on oletettu, että moottoria ei käytetä alle 40 % sähköntuotannon teholla. Laskelmissa on oletettu, että käytössä on akkuja sähkön varastointia varten riittävästi niin, että voidaan tuottaa sähköä varastoon seuraavan 24 tunnin tarvetta varten. Jos sähkönkäyttöä ei ole riittävästi seuraavan 24 tunnin ajanjaksolla, ei kaasumoottoreita käytetä. Todellisessa käyttötilanteessa kaasumoottorin käyttöä ohjaa voimakkaasti ostosähkön hinta kyseisenä ajankohtaan. Ja on myös mahdollista tällöin tuottaa sähköä ulkopuolisiin tarpeisiin. Ostohinnan muutoksia ja tuotantoa ulkopuolisiin tarpeisiin ei tässä tarkastelussa oteta huomioon.

Kaasumoottorin lämmöntuotanto on noin 10 – 20 % suurempi kuin sähköntuotanto riippuen käytettävästä kaasumoottorista ja moottorin käyttötehosta. Lämmöntuotanto verrattuna sähköntuotantoon nousee, mitä pienemmällä teholla verrattuna maksimitehoon kaasumoottoria käytetään. Näissä laskelmissa on lämmöntuotannon oletettu olevan 10 % suurempi kuin sähköntuotanto tehosta riippumatta. Lämmöntuotannon osalta on tarkasteltu vaihtoehtoja, että kaikki saatava lämpö käytetään Lempäälä-talossa eikä muita lämpöasiakkaita ole sekä vaihtoehtoa, että ylijäämälämpö saadaan toimitettua muille asiakkaille. Jos muita lämpöasiakkaita ei ole, sähköntuotantoa täytyy rajoittaa yhden asiakkaan lämmöntarpeen mukaan tai jättää esimerkiksi osa savukaasujen lämmöstä talteenottamatta. Tehdyissä laskelmissa on yhden lämpöasiakkaan tapauksessa rajoitettu sähköntuotantoa niin, että kaikki hukkalämpö on käytettävissä lämmöntuotantoon.

Kuten jo aiemmin on tullut ilmi, pysäköintilaitoksen sähköenergiantarpeeseen vaikuttaa suuresti sähköautojen lataus. Tässä työssä tarkastellaan erikseen energiantuotantoa erilaisilla sähköautolataustarpeilla. Aloitetaan tarkastelu nykyisten suunnitelmien mukaisesta 2 sähköauton latauspaikasta. Lisäksi tarkastellaan tilannetta, jos sähköautolatauspaikkoja on käytössä 50, 100, 150, 200 tai 250 kappaletta. Sähköautopaikkojen määrästä riippumatta käytetään näissä tarkasteluissa aiemmin esitettyä taulukon 3 käyttöastejakaamaa.

Taulukossa 4 on esitettynä eri tehoisten kaasumoottoreiden sähkö- ja lämpöenergian tuotanto silloin kun ei ole muita lämpöasiakkaita ja pysäköintilaitoksessa on kaksi sähköautolatauspaikkaa. Suurin sähkö- ja lämpöenergian tuotto saadaan 124 kW<sub>e</sub> kaasumoottorilla. Sähköenergiaa saadaan 424 MWh ja lämpöenergiaa 466 MWh vuodessa. Tämä tar-



koittaa noin puolta sähköenergian ja vajaata kolmasosaa lämpöenergian vuosittaisesta tarpeesta. Tutkituista moottorivaihtoehtoista vain pienimmällä 80 kW<sub>e</sub> moottorilla päästään yli 4 000 tunnin huipunkäyttöaikaan.

**Taulukko 4.** Kaasumoottoreiden sähkö- ja lämpöenergian tuotto sekä moottorin käyttöaika ja huipunkäyttöaika, kun kaikki lämpöenergia käytetään Lempäälä-talossa ja pysäköintilaitoksessa on kaksi sähköauton latauspaikkaa.

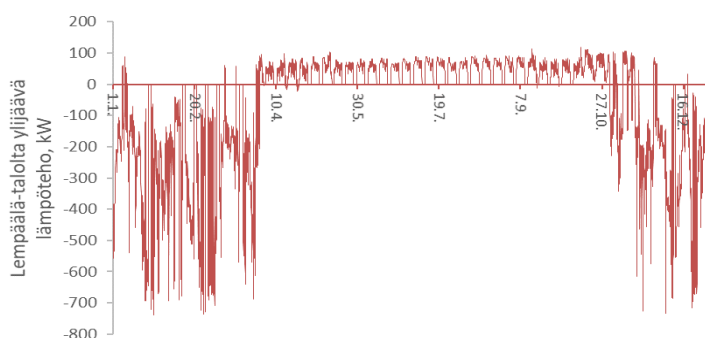
Kaasu- moottori kW <sub>e</sub>	Sähkö- energia MWh/a	Osuus vuosikulu- tuksesta	Lämpö- energia MWh/a	Osuus vuosikulu- tuksesta	Moottorin käyttö h/a	Huipun- käyttöaika h/a
80	365	45 %	402	28 %	4 897	<b>4 567</b>
100	396	49 %	436	30 %	4 143	3 961
<b>124</b>	<b>424</b>	<b>52 %</b>	<b>466</b>	<b>32 %</b>	3 620	3 419
170	412	51 %	453	31 %	2 833	2 423
190	390	48 %	428	29 %	2 469	2 050

Taulukossa 5 on esitetty sähkö- ja lämpöenergian vuosituotanto silloin, kun kohteesta ylijäävä lämpö voidaan hyödyntää muille asiakkaille. Myös tässä tapauksessa 124 kW<sub>e</sub> moottorilla päästään parhaimpaan sähkö- ja lämpöenergiantuottoon. Sähköenergiaa saadaan 646 MWh vuodessa, mikä vastaa 80 % kohteen sähkönkulutuksesta. Lämpöenergiaa saadaan kohteen käyttöön 456 MWh, mikä vastaa vajaata kolmasosaa vuosittaisesta lämpöenergian tarpeesta. Tämän lisäksi lämpöä jää yli 259 MWh myytäväksi muille asiakkaille.

**Taulukko 5.** Kaasumoottorin sähkö- ja lämpöenergian tuotto sekä moottorin käyttöaika ja huipunkäyttöaika, kun Lempäälä-talosta ylijäävä energia voidaan hyödyntää muille lämpöasiakkaille ja pysäköintilaitoksessa on kaksi sähköauton latauspaikkaa.

Kaasu- moottori kW <sub>e</sub>	Lempäälä-talolle ja pysäköintilaitokselle				Muille lämpöasiakkaille			Moottorin käyttöaika h/a	Huipun- käyttöaika h/a
	Sähköenergia		Lämpöenergia		Lämpö- energia	Ulkolämpötila alle 0°C	yli 0°C		
	MWh/a	osuus/a	MWh/a	osuus/a	MWh/a	MWh/a	MWh/a		
80	569	70 %	399	27 %	231	9	223	8 148	<b>7 115</b>
100	613	75 %	428	29 %	250	11	239	7 570	<b>6 126</b>
<b>124</b>	<b>646</b>	<b>80 %</b>	<b>456</b>	<b>31 %</b>	<b>259</b>	<b>12</b>	<b>247</b>	7 328	<b>5 211</b>
170	613	76 %	431	30 %	248	11	237	6 693	3 607
190	578	71 %	400	27 %	240	11	229	6 168	3 043

CHP-tuotannossa lämpöä jää muille asiakkaille enimmäkseen kevästä syksyyn, kun ulkoalueiden sulanapitojärjestelmä ei ole käytössä. Talvella lämpöä jää hetkittäin yli lähinnä silloin, kun ulkolämpötila ylittää sulanapidon käyttölämpötilan. Näissä laskelmissa sulanapitojärjestelmä kytketään pois päältä  $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa. Lämpöenergiantuotannon lämpötase käytettäessä  $124\text{ kW}_e$  kaasumoottoria esitetään kuvassa 24. Positiiviset arvot tarkoittavat, että kaikkea lämpöenergiaa ei tarvita Lempäälä-talossa ja energiaa jää myytäväksi muille. Negatiiviset arvot tarkoittavat, että kaasumoottorin lämmöntuotanto ei riitä Lempäälä-talon tarpeisiin. Lämpöenergiaa jää vuodessa  $124\text{ kW}_e$  moottoria käytettäessä  $259\text{ MWh}$  myytäväksi muille kuin Lempäälä-talolle. Tästä energiasta vain  $12\text{ MWh}$  eli alle  $5\%$  tuotetaan ulkolämpötilan ollessa alle  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Kuva 24**  $124\text{ kW}_e$  kaasumoottorilla tuotetun lämpöenergian riittävyys vuoden jaksolla Lempäälä-talon tarpeeseen. Positiiviset lukemat tarkoittavat ylijäävää lämpöä, negatiiviset lisälämmön tarvetta.

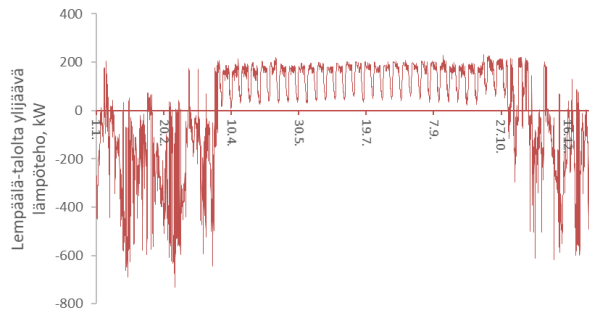
Sähköautojen latauspaikkojen lisääminen ja niiden käyttäminen lisäävät sähkönkulutusta. Taulukossa 6 on esitetty latauspaikkojen vaikutus sähkön- ja lämmöntuotantoon. Taulukossa on tarkasteltu CHP-tuotantoa 50, 100, 150, 200 ja 250 latauspaikalla yhdellä ja kahdella kaasumoottorilla, joiden käyttöaste on aiemmin taulukossa 3 esitetyn mukainen ja latausteho  $3,7\text{ kW}$ . Kahden kaasumoottorin käyttö tuo laajemman käyttöalueen, koska voidaan pienemmän kulutuksen aikaan käyttää vain toista kaasumoottoria. Tässä tarkastelussa on oletettu, että Lempäälä-talon lämmöntarpeen ylijäävä lämpöenergia voidaan hyödyntää muille lämpöasiakkaille.

Näiden laskelmien mukaisesti 50 ja 100 sähköautolatauspaikan kapasiteetilla laskennassa käytetyllä latauksen käyttöasteella toisen moottorin lisääminen  $124\text{ kW}_e$  moottorin rinnalle tuo lisätuottoa sähköntuotantoon  $57 - 230\text{ MWh}$  eli  $6 - 24\%$ . Jos käytetään  $170\text{ kW}$  moottoria, toisen moottorin lisääminen tuo lisätuottoa sähköntuotantoon  $57 - 75\text{ MWh}$  eli  $6 - 7\%$ . Kun sähköautojen latauspaikkoja lasketulla käyttöasteella on käytössä vähintään 150 kappaletta, on selvästi kannattavaa kahden moottorin käyttäminen. Näiden laskelmien mukaan  $170\text{ kW}_e$  moottorin rinnalle tuleva  $100\text{ kW}_e$  moottori antavat parhaimman energiantuoton, kun sähköautojen latauspaikkoja on käytössä  $150 - 250$  kappaletta.

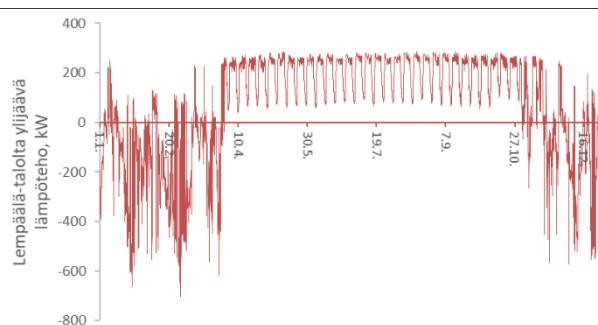
Kuvissa 25 ja 26 on vielä esitettyinä lämpöenergian riittävyys Lempäälä-talolle ja muille asiakkaille myytäväksi jäävän lämmön määrä silloin, kun käytetään kahta kaasumoottoria. Tarkastelussa käytettyjen sähkömoottoreiden tehot ovat 100 ja 170 kW<sub>e</sub>. Kuvassa 25 on tarkasteltu lämpöenergian tuottoa 150 autopaikalla. Kuvassa 26 latausautopaikkoja on 250 kappaletta. Myös suuremmilla sähköautolatausten määrillä lämpöä jää muille asiakkaille kuin Lempäälä-talolle myytäväksi lähinnä keväästä syksyyn. Vain noin 5 % ylimääräisestä lämmöntuotannosta tuotetaan ulkolämpötilan ollessa alle 0 °C. Tämä tarkoittaa, että muille asiakkaille jää myytäväksi lämpöenergiaa pakkasaikana 39 MWh vuodessa ja ulkolämpötilan ollessa yli 0 °C 803 MWh, kun sähköautolatauspaikkoja on käytössä 150 kappaletta. Vastaavasti 250 latauspaikan tapauksessa lämpöä jää muille asiakkaille myytäväksi 66 MWh vuodessa pakkasaikana ja lämpötilan ollessa yli 0 °C 1 176 MWh.

**Taulukko 6.** Kaasumoottorin sähkö- ja lämpöenergian tuotto sekä moottorin käyttöaika ja huipunkäyttöaika eri sähköautolatauksen määrillä, kun Lempäälä-talosta ylijäävä energia voidaan hyödyntää muille lämpöasiakkaille.

Sähköautojen latauspaikat kpl	Kaasu- moottori 1 kW <sub>e</sub>	Kaasu- moottori 2 kW <sub>e</sub>	Lempäälä-talolle ja pysäköintilaitokselle				Muille asiakkaille	
			Sähköenergia		Lämpöenergia		Lämpö- energia	Ulkolt alle 0°C
			MWh/a	osuus/a	MWh/a	osuus/a	MWh/a	MWh/a
50	124	0	846	79 %	530	36 %	405	17
<b>50</b>	<b>170</b>	<b>0</b>	<b>878</b>	<b>82 %</b>	<b>559</b>	<b>38 %</b>	<b>411</b>	<b>19</b>
50	124	80	935	88 %	595	41 %	437	19
50	124	100	931	87 %	594	41 %	434	19
50	170	100	931	87 %	594	41 %	434	19
50	124	190	913	86 %	584	40 %	424	19
100	124	0	968	73 %	564	39 %	504	19
<b>100</b>	<b>170</b>	<b>0</b>	<b>1 123</b>	<b>84 %</b>	<b>655</b>	<b>45 %</b>	<b>584</b>	<b>26</b>
100	124	80	1 198	90 %	705	48 %	617	28
100	124	100	1 198	90 %	705	48 %	617	28
100	170	100	1 198	90 %	705	48 %	617	28
100	124	190	1 197	90 %	705	48 %	616	28
150	124	0	1 013	60 %	580	40 %	539	20
150	170	0	1 289	76 %	702	48 %	720	29
150	124	80	1 420	84 %	777	53 %	789	37
<b>150</b>	<b>124</b>	<b>100</b>	<b>1 457</b>	<b>86 %</b>	<b>805</b>	<b>55 %</b>	<b>801</b>	<b>39</b>
<b>150</b>	<b>170</b>	<b>100</b>	<b>1 462</b>	<b>86 %</b>	<b>809</b>	<b>55 %</b>	<b>803</b>	<b>39</b>
150	124	190	1 462	86 %	809	55 %	803	39
200	124	0	1 045	56 %	590	40 %	564	21
200	170	0	1 354	73 %	723	50 %	770	31
200	124	80	1 557	84 %	808	55 %	909	41
200	124	100	1 644	89 %	851	58 %	961	47
<b>200</b>	<b>170</b>	<b>100</b>	<b>1 725</b>	<b>93 %</b>	<b>902</b>	<b>62 %</b>	<b>999</b>	<b>54</b>
200	124	190	1 725	93 %	902	62 %	999	54
250	124	0	1 066	50 %	594	41 %	582	21
250	170	0	1 397	66 %	739	51 %	802	32
250	124	80	1 614	76 %	829	57 %	951	42
250	124	100	1 735	82 %	875	60 %	1 038	49
<b>250</b>	<b>170</b>	<b>100</b>	<b>1 938</b>	<b>91 %</b>	<b>959</b>	<b>66 %</b>	<b>1 176</b>	<b>66</b>
250	124	190	1 989	94 %	983	67 %	1 208	71



**Kuva 25** Kahdella kaasumootorilla, 100 ja 170 kW, tuotetun lämpöenergian riittävyys vuoden jaksolla Lempäälä-talon ja pysäköintilaitoksen tarpeeseen, kun sähköautolatauspaikkoja on 150 kappaletta. Positiiviset lukemat tarkoittavat ylijäävää lämpöä, negatiiviset lisälämmön tarvetta.



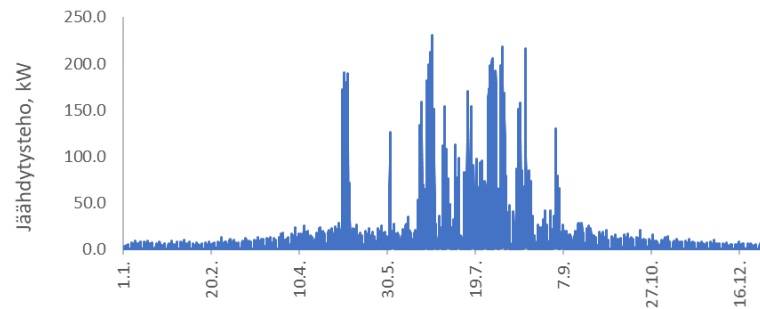
**Kuva 26** Kahdella kaasumootorilla, 100 ja 170 kW, tuotetun lämpöenergian riittävyys vuoden jaksolla Lempäälä-talon ja pysäköintilaitoksen tarpeeseen, kun sähköautolatauspaikkoja on 250 kappaletta. Positiiviset lukemat tarkoittavat ylijäävää lämpöä, negatiiviset lisälämmön tarvetta.

## 6.4.2 Kaukokylmä

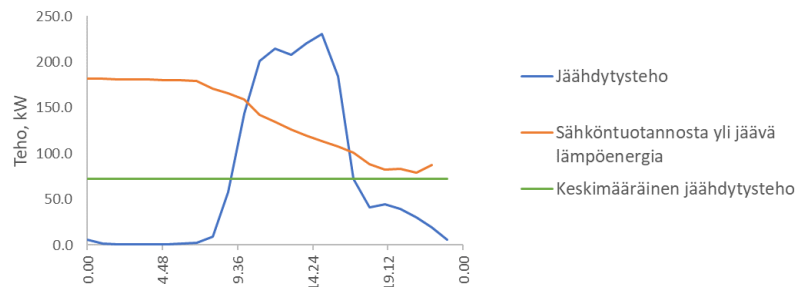
Kaukokylmäverkostoa tullaan laajentamaan tässä työssä käsiteltävälle alueelle Lempäälän kuntakeskukseen. Kuten jo aikaisemmin on mainittu, kaukokylmä tullaan tuottamaan pääosin vapaajäähdytyksellä järvivettä hyödyntäen. Kaukojäähdytysverkon mitoituslämpötilana menovedelle asiakkaalle on 9 °C ja paluuedelle 17 °C. Kesäaikaan, kun jäähdytystä tarvitaan enemmän ja järvivesi on lämpimillään, tarvitaan lisäjäähdytystehoa. Olemassa olevaa kaukokylmäverkostoa lisäjäähdytetään kompressoriteknikalla. Kaukolämpöverkon laajentuessa lisäjäähdytyskapasiteettia tullaan tarvitsemaan.

Lempäälä-talon vaatima jäähdytysteho mallinnetun vuoden ajalta on esitettyinä kuvassa 27. Jäähdytystä käytännössä tarvitaan kesäkuukausina kesäkuusta elokuuhun ja lisäksi satunnaisemmin keväällä. Jäähdytysteho kohteessa kesäkuuisena hellepäivänä on esitetty kuvassa 28. Kyseessä on mallinnuksen mukaisesti vuoden suurimman jäähdytystehon päivä. Suurimmillaan tarvittava jäähdytysteho on tässä mallinnuksessa 230 kW. Kyseisen vuorokauden jäähdytystehon keskiarvo on 72 kW. Lisäksi kuvassa 28 on esitettyinä läm-

pötase, joka esittää kaasumootoreista saatavaa Lempäälä-talon tarpeesta ylijäävää lämpöenergiaa. Esimerkin lämpötaseen laskennassa on ollut 150 sähköauton latauspaikkaa sekä sähköteholtaan 170 kW<sub>e</sub> ja 100 kW<sub>e</sub> kaasumootorit.

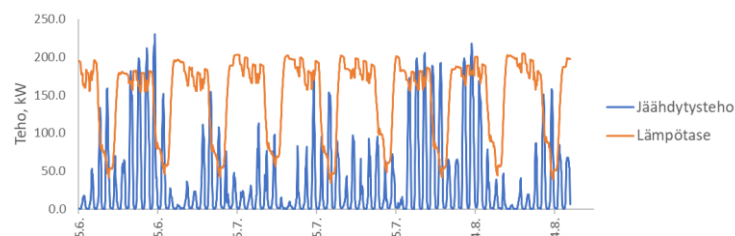


**Kuva 27** Lempäälä-talon jäähdytysteho mallinnetun vuoden aikana.



**Kuva 28** Lempäälä-talon jäähdytystehon tarve kesäkuisena hellepäivänä. Kyseisenä päivänä saavutetaan jäähdytystehontarpeen vuotuinen maksimi.

Kuvassa 29 on esitetty jäähdytysteho ja lämpötase kesäajalta 15.6. – 15.8. Lämpötaseessa on latausautopaikkojen ja kaasumootoreiden määrä sama kuin kesän suurimman jäähdytystehopäivän tarkastelussa kuvassa 28. Kuten kuvasta nähdään lämpöä tässä tilanteessa jää yli keskimäärin enemmän kuin jäähdytysenergian tarvetta pois lukien noin kolme viikkoa kuuminta aikaa. Sorptiotekniikoissa kylmäkerroin lämmön osalta jää selvästi alle yhden, absorptiotekniikan osalla kylmäkerroin on luokkaa 0,6. Joten periaatteessa lämpöä tässä tilanteessa riittää jäähdytyskäyttöön. Edelleen kuitenkin huipputehoa varten tarvitaan muita ratkaisuja.



**Kuva 29** Lempäälä-talon jäähdytystehon tarve kesäajalla 15.6. - 15.8. sekä kaasumootorin sähköntuotannosta ylijäävä lämpöenergia, kun käytetään 170 ja 100 kW<sub>e</sub> kaasumootoreita ja sähköautolatauspaikkoja, joiden käyttöaste on 4,6 tuntia päivässä, on 150 kappaletta.

## 7. TULOSTEN ANALYSOINTI

Tässä työssä tarkasteltiin korttelikohtaista energiantuotantoa Lempäälän kuntakeskukseen. Sähköenergiaa tarkastelussa tuotetaan aurinkopaneeleilla, yhdistettyä lämmön- ja sähköntuotantoa kaasumootorilla. Sähköenergian varastointiin käytetään akustoja. Akustoja ei ole tässä työssä mitoitettu. Lisäksi on tarkasteltu kylmäenergian tuotantoa kaukokylmäverkostoon, kylmäenergian varastointia sekä energia- ja ilmastokysymyksien poliittista taustaa ja sitä kautta tulevia säädöksiä ja ohjauskeinoja.

Kaasumootorien mitoituslaskelmat ja lämmitysverkostojen virtaama- ja teholaskelmissa käytettiin osaksi hyväksi Lempäälä-talon elinkaarikonsultin Sweco Talotekniikan yleissuunnitteluvaiheessa tekemiä energiankulutuksen tavoitelaskelmia sekä Lempäälä-talon aurinkopaneelien tuottolaskelmia. Sulanapitopiirien energiankulutuslaskelmat sekä lämpöverkostojen teho- ja virtaamalaskenta tehtiin tätä työtä varten. Laskennassa oletuksena oli, että aurinkopaneeleista saatavan sähköenergian käyttö on aina ensisijaista. Jos sähköenergian tarve seuraavan 24 tunnin aikana on kyllin suuri kaasumootorin käynnistämiseksi, kaasumootoreilla tuotetaan sähköenergiaa. Sähköenergia käytetään heti tai varastoidaan akustossa seuraavan 24 tunnin käyttöä varten. Oletuksena on, että sähköakkuja on käytettävissä tähän tarvittava määrä. Lämpöenergiaa saadaan kaasumootorista talteen moottorin jäähdytyksestä sekä savukaasuista. Lämpöenergian käyttöä tutkittiin sekä Lempäälä-talon ja sen ympäristön sulanapitojärjestelmän että muiden lämpöasiakkaiden käyttöön. Vaihtoehtona tarkasteltiin myös lämmön käyttämistä kaukokylmän tuotantoon.

Tässä osiossa käydään läpi työn keskeiset tulokset sekä tuloksiin liittyvät epävarmuustekijät. Tämän jälkeen käsitellään ehdotuksia ja pohdintoja jatkotoimenpiteiksi ja lisäselvityksien aiheiksi.

### 7.1 Tulokset

Lempäälä-talon ja pysäköintilaitoksen sähkönkulutuksia vastaavan kaasumootorin optimaalinen koko on  $124 \text{ kW}_e$ , kun sähköauton latauspaikkoja on suunnitelman mukaisesti 2 kappaletta. Jo 50 latauspaikalla optimaalisin kaasumootorin koko on  $170 \text{ kW}_e$ . Jos käytetään  $170 \text{ kW}_e$  kaasumootoria, toisen sähköteholtaan  $100 \text{ kW}_e$  kaasumootorin hankinta on kannattavaa, kun sähköauton latauspaikkoja käyttöasteella 4,6 tuntia vuorokaudessa on käytössä 150 kappaletta. Nämä kaksi moottoria ovat optimaalisin vaihtoehto vielä 250 sähköauton latauspaikan kapasiteetilla.

Lämpöenergiaa jää yli Lempäälä-talon tarpeista lähinnä keväästä syksyyn aikana, jolloin kulkuväylien sulanapito ei ole käytössä. Työssä tarkasteltiin jäähdytyksen kannalta tilannetta, jossa on käytössä kaksi kaasumootoria  $100$  ja  $170 \text{ kW}_e$  ja sähköautojen latausau-

topaikkoja on 150 kappaletta käyttöasteella 4,6 tuntia vuorokaudessa. Tällöin jää lämpöenergiaa yli Lempäälä-talon tarpeisiin nähden suurimman osan kesäajasta. Yli jäävä lämpöenergia riittäisi suurimman osaa kesästä Lempäälä-talon jäähdytyksen käyttöön sorptiotekniikkaa hyväksi käyttäen, jos käytetään lisäksi kylmäakkuja. Noin kolme viikkoa jäähdytystarve on suurempi kuin sorptiotekniikkaa varten on ylijäämälämpöä tarjolla. Silloin tarvitaan muulla tavalla tuotettua lisäjäähdytystä tai erillistä lisälämmötuotantoa sorptiojäähdytintä varten. Sorptiotekniikkaa käytettäessä investointikustannukset ovat suuret ja lämpöenergian  $SCOP_{\text{lämpö}}$ -luku on vain 0,6 – 0,75. Tästä syystä sorptiotekniikat ovat kannattavia lähinnä silloin, kun lämpöenergiaa on ilmaiseksi tai lähes ilmaiseksi saatavilla. Lempäälä-talon tarpeista jää yli lämpöä lähinnä silloin kuin ulkolämpötila on yli 0 °C. Tällöin perinteisen kaukolämpöverkoston menoveden lämpötila on alle 90 °C ja siten kaasumoottorista saatava lämpö on suoraan käytettävissä perinteisessä kaukolämpöverkossa ja sitä kautta myytävissä asiakkaille.

Näillä laskelmilla lämpöenergiaa ei juurikaan jää yli Lempäälä-talon tarpeen talviaikana, kun sulanapitojärjestelmä on käytössä. Lempäälä-talo tarvitsee talviaikana myös lisää lämpöenergiaa. Muiden käyttäjien liittäminen matalalämpöverkkoon ei tällä laskelmalla näyttäisi kannattavalta.

On huomioitava, että laskelmissa on käytetty yleissuunnitteluvaiheen tavoite-energiakulutuksia. Todellinen käyttö voi poiketa merkittävästikin mallinnetusta kulutuksesta. Rakennuksen vaipan yli menevät lämpöhäviöt ovat helpoimmin laskettavissa etukäteen. Ilmanvaihdon lämmitykseen vaikuttavat käyttöasteet ja käyttötavat, kuten myös sähköenergian kulutukseen ja yllilämpöjen määrään. Liiketilöiden käyttötavat voivat myös muuttua rakennuksessa ja tällä on vaikutusta energiankäyttöön.

Sulanapidon energiankulutuksen laskenta on tehty tätä työtä varten. Laskennassa on tarkasteltu lumisateen aikaista energiankäyttöä sekä valmiustilassa olevan järjestelmän energiankäyttöä. Sulanapitojärjestelmän tehonkulutus lumisadetilanteessa on suhteellisen hyvin laskettavissa. Esimerkiksi Ventän insinööritoimistossa on koemittauksilla varmistettu teorian ja käytännön tulosten yhteensopivuus (Ventä 2014). Lumisateiden välillä sulanapitojärjestelmä on valmiustilassa ja kovemmilla pakkasilla minimikäytöllä. Valmiustilan energiankäytön laskentaan liittyy epävarmuuksia. Tehontarve on arvioitu kokemukseräisen keskimääräisen lämmönsiirtokerroimen perusteella (Sipilä et al. 2001). Tämä ei ota huomioon esimerkiksi kyseisen ajankohdan tuulta tai ilmankosteutta.

Sähköautolatauspaikkojen käytön arvioiminen on vielä vaikeaa, koska kokemuksia tällaisista suurien sähköautojen määristä ei ole vielä olemassa. Sähköautojen määrän kasvamisesta on vaikea ennustaa. Tähän vaikuttaa lainsäädännön ja valtion ohjauksen lisäksi tekniikan ja sitä kautta hintojen kehitys sekä kuluttajien asenteet ja asenteiden muuttumisen nopeus. Sähköautolatauspaikkojen keskimääräiseksi käyttöajaksi päivittäin on laskennassa käytetty 4,6 tuntia. Käyttö voi kuitenkin poiketa tästä huomattavasti. Laskennat on tehty oletuksella, että akkukapasiteettia sähköenergian varaamiseksi on tarpeellinen



määrä käytössä 24 tunnin ajaksi. Todellinen akkukapasiteetti voi olla tätä pienempi. Toisaalta myös sähköautojen akkuja voidaan käyttää myös energiantuotannon varastona.

Kaasumoottorin mitoituksessa ja käytössä kannattaa huomioida myös verotukselliset asiat. Sähköntuotannon omaan käyttöön jäädessä alle 800 MWh/vuosi, tuotanto ei ole sähköverollista. Oman sähköntuotannon vuosituottoon kuuluvat sekä Lempäälä-talon aurinkopaneeleiden että kaasumoottoreiden sähköenergiantuotto. Alkutilanteessa, kun sähköautolatauspaikkoja on vain kaksi kappaletta, tätä rajaa ei vielä ylitetä. Mutta raja tulee pian vastaan sähköautolatauksen ja sitä kautta sähkönkulutuksen kasvaessa.

Kun tarkastellaan päästökauppalakia, kaukolämpötehona tarkastellaan nimellistehoa kaukolämpölaitoksella. Nimellistehon tulee olla alle 20 MW, jotta päästökauppaan ei tarvitse siirtyä. Nykyiset kaukolämpökattilat ovat teholtaan 19 MW. Tämän laskelman mukaisen CHP-tuotannon lisääminen lämpölaitoksen yhteyteen ei ylitä päästökaupparajaa.

Korttelikohtaisen energiantuotannon hanke vie eteenpäin sekä Euroopan unionin että kansallisen ja paikallisen tason energia- ja ilmastotavoitteita. Erilaisia taloudellisia tukia ja hankkeita on olemassa ja niitä kannattaa käyttää hyväksi tällaisissa hankkeissa. Vaihtoehtoina on esimerkiksi Euroopan unionin rakennerahastojen tuki, jota voi saada hankevalmisteluun, ja joko kansallinen uusiutuvan energian energiatuki tai uuden teknologian energiatuki investointikustannuksiin. Euroopan unionin suoraan tukemat hankkeet ovat hakemisprosessina huomattavasti vaikeampia ja siten sopivat paremmin suurille useamman osapuolen yhteisille hankkeille.

## 7.2 Jatkotoimenpiteet

Laskelmat on tehty sillä oletuksella, että korttelikohtaisen energiantuotannon sähkönkäyttäjänä on vain Lempäälä-talo ja pysäköintilaitokset. Jos sähkönkäyttäjää saadaan enemmän, laskelmat tulee tehdä uudelleen. Muita mahdollisia sähkönkäyttäjää ovat lämpölaitoksen oma sähkönkulutus sekä katuvalaistuksen sähkönkäyttö. Mahdollisesti myös kuntakeskuksen alueella voisi olla sähköautojen pikalatauspisteitä. Toisaalta kalliimpana sähkönhinnan aikana kannattaa sähköä tuottaa myös myytäväksi. Taas toisaalta on aikoja, jolloin tukkusähkö on hyvin edullista. Silloin kannattaa ostaa verkosta sähkö myös akkuihin.

Työ- ja elinkeinoministeriön alainen älyverkkotyöryhmä loppuraportissaan suositteli lainsäädännön muutoksia energiayhteisöjen kohdalla (Pahkala et al. 2018). Jos näin lähivuosina tulee tapahtumaan, mahdollistaisi se myös kuluttaja-asiakkaiden liittymisen energiayhteisöön ja sitä kautta myös korttelikohtaiselle sähköenergiantuotannolle olisi mahdollisuus saada enemmän asiakkaita. Älyverkkotyöryhmän raportissa otettiin myös esille sähkövarastojen käyttö ja niiden kaksinkertaisen sähköverotuksen poistaminen. Myös sähkön hinta tulee muuttumaan loppukäyttäjälle siten, että tehonkäyttö tullaan paremmin

huomioimaan. Näin myös sähkövarastojen käyttö sähköverkoston tehon tasaajana voi tulevaisuudessa olla taloudellisesti nykyistä kannattavampaa.

Jos sähkönkäyttäjää on paikallisella energiantuotannolla enemmän, on mahdollisuus saada lämpöenergiaa myös muita käyttäjiä varten. Tällöin voidaan harkita matalalämpöistä kaukolämpöverkkoa myös muille asiakkaille. Matalalämpöiseen kaukolämpöverkoon liittyminen vaatii, että rakennuksen lämmitysjärjestelmät on suunniteltu tämä huomioiden. Joten kyseeseen tulevat uudet rakennukset, joissa matalammat lämpötilat voidaan huomioida jo suunnitteluvaiheessa.

Myös aurinkopaneeleiden määrää voidaan myöhemmin lisätä. Jos aurinkopaneeleja saadaan enemmän, kesäajan CHP-tuotantoa tarvitaan vähemmän ja siten jää myös vähemmän lämpöenergiaa käytettäväksi.

Kaukokylmän tuotannossa kannattaisi selvittää lämpöpumppujen käytön mahdollisuutta. Kaukokylmän jäähdytyksen paluuedestä lämpöä siirretään tällöin lämpöpumpulla kaukolämpöverkoston. Lämpöpumppuratkaisulla päästään jopa 90 °C kaukolämmön menoveden lämpötilaan ja 4 °C kaukokylmän menoveden lämpötilaan. Kaukokylmän tarve on kesällä, jolloin myös kaukolämpöverkoston menoveden lämpötila on alhainen.

Kaukokylmäverkostossa kannattaa selvittää kylmäakkujen käyttöä. Kylmäakuilla voidaan kattaa noin kolmasosa tehontarpeesta ja näin vähentää vastaavasti laiteinvestointien tarvetta. Lisäksi energiavarastojen mahdollisuudet myös lämpöpuolella kannattaa tutkia. Suunnitteluvaiheessa kannattaa myös laskea kannattavuudet sähköakkujen ja lämpöakkujen välillä, kumpi on taloudellisempi rakentaa. Tässä tulee huomioida myös tilantarve. Lämpö- ja kylmäakut voisivat olla myös jossain muualla verkoston alueella kuin lämpölaitoksen yhteydessä.

Talvella Lempäälä-talosta palaava kaukolämpövesi on erittäin kylmää varsinkin silloin, kun ei sada lunta. Jatkossa kannattaisi selvittää, voiko palaavaa vettä hyödyntää jäähdytykseen. Jäähdytettäviä kohteita talvella on esimerkiksi palvelintilat.

Kaasu-ilmaseoksen jäähdytykseen kaasumoottorissa käytetään yleensä erillistä jäähdytystä, koska lämpöverkoston lämpötila on liian korkea tähän jäähdytykseen. Tässä tapauksessa katualueen sulanapidon vuoksi kohteesta palaava kaukolämpö on normaalia matalammassa lämpötilassa talviaikaan. Paluueden käyttöä kaasu-ilmaseoksen jäähdytykseen kannattaa tutkia. Vaihtoehtona on myös hyödyntää kaasu-ilmaseoksen jäähdytyksen energia olemassa olevien kattiloiden palamisilman esilämmitykseen.

Automaation rooli korttelikohtaisessa energiantuotannossa on merkittävä. Jotta järjestelmä pystyy reagoimaan nopeasti muuttuviin olosuhteisiin, tarvitaan älykästä ohjausta. Sähkönkäytöstä tarvitaan jatkuvaa seurantaa sekä ennustamista sekä Lempäälä-talon että sähköautolatauksien osalta. Sähköautojen latausjärjestelmän tulee ohjata latausta niin, että sähkönkäytön tehohuippuja vältetään, mutta samalla taataan asiakkaille tasapuolinen

latausenergian saanti. Myös lämpöverkostoissa älykäs ohjaus ennakoi tulevan lämmöntarpeen. Automaation avulla voidaan myös pienentää lämmityksen tehohuippuja. Koska sulanapito kuluttaa energiaa enemmän kuin tutkittava kohde muuten, on sen ohjaukseen ja säätöön sekä seurantaan kiinnitettävä erityistä huomiota. Automaatiota tarvitaan myös tuotannon ja energiavarastojen ohjaamiseen. Myös automaattinen optimointi sähkön oston ja tuotannon sekä varastoinnin osalta ovat keskeisessä roolissa.

Tässä työssä ei ole tehty kannattavuuslaskelmia. Jatkotyönä tarvitaan kannattavuuslaskelmat investoinnin kannattavuuden laskemiseksi sekä laskelmat hinnoittelurakenteen luomiseksi.

## 8. YHTEENVETO

Korttelikohtainen energiantuotanto tukee uusiutuvien energioiden käytön lisäämistä ja energiaverkostojen tehokasta käyttöä, joita suositaan strategioissa sekä Euroopan Unionin tasolla, valtakunnallisesti että paikallisesti. Hanke lisäisi myös Lempäälän kunnan tunnettavuutta edelläkävijänä energia-asioissa.

Tässä tutkielmassa tarkasteltiin, miten korttelikohtainen energiantuotanto soveltuu Lempäälän kuntakeskukseen. Työssä tarkasteltu alue sopii hyvin korttelikohtaiseen energiantuotantoon. Alueella on jo olemassa lämpölaitos, jonka yhteyteen paikallisen energiantuotannon laitteet on ajateltu sijoittaa. Tämä tuo synergiaetua, koska voidaan hyödyntää olemassa olevia lämpöverkkoja, automatiikkaa sekä myös lämpölaitoksen savupiippua. Kuntakeskus on tulevina vuosina voimakkaan muutoksen alla ja pääosin alue on vielä rakentumatta.

Pääpaino työssä on lämpöverkostojen lämpötehojen ja -virtaamien mitoittamisella. Tässä työssä mitoitettiin lisäksi kaasumoottorit, jotka ovat optimaaliset Lempäälä-talon ja kuntakeskukseen tulevien pysäköintilaitosten käyttöön. Lähtökohtana kaasumoottoreiden mitoitukselle oli näiden edellä mainittujen kohteiden sähkönkäyttö vähennettynä Lempäälä-talon katolle suunniteltujen aurinkopaneeleiden tuotolla. Työssä tarkasteltiin myös sähköautojen latauksen lisääntymien vaikutusta sähkönkulutukseen ja -tuotantoon sekä sen vaikutusta korttelikohtaisen energiantuotannosta saatavaan lämmitystehoon. Sähköautolatauksella lisääntyessään on suuri vaikutus sähköenergian käyttöön. On huomioitava, että sähköautot ja niiden akut ovat yleistyessään myös käytettävissä sähkövarastoina paikallisissa energiayhteisöissä.

Nykylainsäädäntö ei mahdollista kuluttaja-asiakkaiden kuten taloyhtiöiden liittymistä paikallisten energiayhteisöjen sähköverkkoihin. Siksi tässä työssä ei ole otettu tarkasteluun kerrostalojen sähkönkulutuksia. Työ- ja elinkeinoministeriön asettaman älyverkko-työryhmän loppuraportti esittää lainsäädännön muuttamista ja sitä kautta edistää energiayhteisöiden syntymistä. Tämä voi muuttaa tilannetta lyhyelläkin tähtäimellä ja sitä kautta muuttaa lähtöasetelmia. Lainsäädännön kehittymistä tulee siksi seurata ja muuttaa suunnitelmia tarvittaessa. Jos sähköntuotantomäärää voidaan kasvattaa ja siten saada myös talviaikaan yli jäävää lämpöä, voitaisiin lämmityksen osalta liittää myös läheisiä kerrostaloja paikallisen energiantuotannon verkostoihin. Koska paikallisen energiantuotannon tuottama kaukolämpö on lämpötilatasoltaan matalampaa, täytyy tämä huomioida verkostoon liitettävän rakennuksen lämpölaitteistojen suunnittelussa. Matalampilämpöinen kaukolämpö vaikuttaa kaukolämpösiirtimien mitoituksen lisäksi lämpöverkostojen, varsinkin ilmanvaihtoverkoston, lämpötilatasoihin sekä ilmanvaihtokoneiden lämpöpattereiden

mitoitukseen. Myös paikallista energiantuotantoa hyödyntävän yksittäisen kerrostalon rakennusautomaatio tulee suunnitella yhteensopivaksi korttelikohtaisen energiantuotannon kanssa, jotta voidaan ennustaa kulutusta ja ohjata hetkellistä tehonkulutusta.

Perustoimisto- ja liikerakennuksesta Lempäälä-talon lämpöenergian käyttö poikkeaa siinä, että tässä kohteessa on laajat ajoliusköjien ja kevyen liikenteen kulkuväylien sulanapitojärjestelmät. Sulanapitojärjestelmän lämmönlähteenä käytetään ensisijaisesti rakennuksesta palaavaa kaukolämpövedä ja toissijaisesti kaukolämmön menovettä. Laskelmien mukaan alle 20 % vuotuisesta energiankulutuksesta voidaan kattaa paluuväden hyödyntämisellä. Vaikka prosenttiosuus vaikuttaa pieneltä, on sillä merkitystä, koska sulanapitojärjestelmän vuotuinen energiankäyttö on suurempi kuin koko rakennuksen lämmitysenergiankäyttö. Sulanapitojärjestelmä kuluttaa eniten energiaa lumisateiden aikana. Sulanapitojärjestelmää pidetään valmiustilassa lumisateiden välillä, kun ulkolämpötila on välillä  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , jolloin myös energiankulutus on merkittävää. Matalammassa ulkolämpötilassa sulanapitojärjestelmän nestettä pidetään sulana pienellä lämmityksellä ja korkeammissa lämpötiloissa lämmitystä ei käytetä lainkaan. Suurista lämpöenergian tarpeen vaihteluista johtuen Lempäälä-taloon tarvitaan ajoittain talviaikaan lisälämmitysenergiaa muista lähteistä. Lämpöenergiaa jää yli Lempäälä-talon tarpeista lähinnä silloin, kun ulkolämpötila on yli  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Palaava kaukolämpövesi on sulanapitojärjestelmästä johtuen huomattavan kylmää. Talvella varsinkin järjestelmän ollessa valmiustilassa on rajoitettava paluulämpötila  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilaan, jotta vältytään jäätymisiltä. Enimmilläänkin kovimmilla pakkasilla paluulämpötila jää alle  $+33\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilaan.

Kaasumoottorista lämpöä on otettavissa talteen yleensä kahdesta eri kohtaa eli moottorin vaipan jäähdityksestä ja savukaasuista. Lämpötila kaasumoottorista lähtevälle lämmitysverkoston vedelle on enintään  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Myös tämän työn laskentatarkastelut on tehty olettamalla, että lämpöä otetaan talteen näistä kahdesta kohdista. Lisäksi kaasumoottorissa tarvitaan jäähditystä puristetulle kaasu-polttoilmaseokselle. Yleensä lämpöverkostojen paluuväden lämpötila on liian korkea seoksen jäähditykselle, mutta tässä tapauksessa kannattaa vielä jatkossa tarkastella mahdollisuutta käyttää paluuvettä hyväksi myös kaasuilmaiseoksen jäähdityksessä.

Työssä tarkasteltiin myös ylijäävän lämmön mahdollista käyttöä kaukokylmän tuotantoon. Jäähditystä voidaan tuottaa lämmön avulla absorptio- ja adsorptiotekniikkaa hyväksi käyttäen. Tarkasteluun otettiin kohteen sähkönkäyttö silloin, kun sähköautojen latauspaikkojen määrä on 150 kappaletta ja jokaista latauspaikkaa käytetään 4,6 tuntia päivittäin. Tällä tarkastelulla lämpöenergiaa määrällisesti jää lähes koko kesäajan kylliksi yli jäähdityksen tuotantoa varten. Suurimpina jäähditystehon aikoina tarvitaan lisäenergiaa joko erillisellä lämmöntuotannolla tai erillisellä jäähdityksellä. Sorptiotekniikka on investointina kallis ja sen kannattavuus vaatisi, että lämpöenergiaa saadaan ilmaiseksi tai lähes ilmaiseksi käyttöön. Lämpöä korttelikohtaisesta energiantuotannosta jää pääsääntöisesti yli vain silloin, kun ulkolämpötila on yli  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tällöin perinteisen kaukolämpöverkoston menoveden lämpötila on alle  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tässä tapauksessa, kun lämpölaite ja sitä

kautta perinteisen järjestelmän kaukolämpöputket ovat samassa yhteydessä, voidaan kaasumootorilla tuotettu ylijäämälämpö hyödyntää myös kaukolämpöverkossa ja näin myydä asiakkaille.

Jäähdytyksen osalta on myös huomioitava, että aurinkopaneelien määrää saatetaan lisätä tulevaisuudessa huomattavasti. Tällöin kaasumootorilla tehtävän sähkön tarve vähenee merkittävästi, eikä silloin ole ylijäämälämpöä käytettäväksi jäähdytyksentuotantoon. Myös kesäaikana on yleensä ollut sähkön markkinahinta alhaisempi, jota kautta oman sähköntuotannon kannattavuus saattaa olla huono.

Kaukokylmäverkoston jäähdytysenergian tuottamisesta lämpöpumpputekniikalta kannattaisi jatkoselvityksissä selvittää. Tällöin jäähdytyksestä saatavaa lämpöä hyödynnettäisiin kaukolämpöverkossa. Lämpöpumpputekniikalla yhdistetyssä lämmön- ja kylmäntuotannossa voidaan päästä jäähdytysverkostossa 4 °C ja kaukolämmössä 90 °C lämpötilatasoon. Tämä kaukolämmön lämpötilataso on hyvinkin riittävä kevät- ja kesäaikana kaukolämpöverkoston.

## LÄHTEET

Energiateollisuus ry (2014a). Rakennusten kaukolämmitys – Määräykset ja ohjeet – julkaisu K1/2013, päivitetty 9.5.2014. Saatavilla: [https://energia.fi/files/502/JulkaisuK1\\_2013\\_20140509.pdf](https://energia.fi/files/502/JulkaisuK1_2013_20140509.pdf), vierailtu: 10.9.2018.

Energiateollisuus ry (2014b). Teho ja vesivirta kaukolämmön maksuperusteina – Suositus K15/2014. Saatavilla: [https://energia.fi/files/586/Teho\\_ja\\_vesivirta\\_SuositusK15\\_2014.pdf](https://energia.fi/files/586/Teho_ja_vesivirta_SuositusK15_2014.pdf), vierailtu: 11.9.2018.

Energiateollisuus ry (2016). Suuret lämpöpumput kaukolämpöjärjestelmissä, loppuraportti 29.8.2016. Saatavilla [https://energia.fi/files/993/Suuret\\_lampopumput\\_kaukolampojajestelmassa\\_Loppuraportti\\_290816\\_paivitetty.pdf](https://energia.fi/files/993/Suuret_lampopumput_kaukolampojajestelmassa_Loppuraportti_290816_paivitetty.pdf), vierailtu 20.9.2018.

Enregiateollisuus ry (2018). Kaukojäähdytystilasto. Saatavilla: [https://energia.fi/ajankoh-taista\\_ja\\_materiaalipankki/materiaalipankki/kaukojaahdytystilasto.html#material-view](https://energia.fi/ajankoh-taista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/kaukojaahdytystilasto.html#material-view), vierailtu 25.2.2019.

Energiavirasto (2015). Sähköverkon rakentamisen ja sähköverkkotoiminnan luvanvaraisuus. Lausunto FinSolar-hankkeelle. Saatavilla: <http://www.finsolar.net/wp-content/uploads/2015/11/Energiaviraston-lausunto-17.11.2015-FinSolar-hanke-dnro-2378-403-20151.pdf>, vierailtu 10.9.2018.

ERA17 (2018). Energiaviisaan rakennetun ympäristön aika 2017 ERA17 -hanke. Internetsivu. Saatavissa: <https://www.era17.fi/finnoon-laaja-alainen-energiasuunnitelma-voitti-fiksu-energia-kilpailun/>, vierailtu 18.9.2018.

Euroopan komissio (2011). Etenemissuunnitelma – siirtyminen kilpailukykyiseen vähähiiliseen talouteen vuonna 2050. Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle. Saatavilla <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0112&from=PL>, vierailtu 11.9.2018

Euroopan komissio (2015). Energiaunionipaketti, Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle, alueiden komitealle ja Euroopan investointipankille, Joustavaa energiaunionia ja tulevaisuuteen suuntautuvaa ilmastomuutospolitiikkaa koskeva puitestrategia. Saatavilla [http://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2014\\_2019/documents/com/com\(2015\)0080/com\(2015\)0080\\_fi.pdf](http://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2014_2019/documents/com/com(2015)0080/com(2015)0080_fi.pdf), vierailtu 17.9.2018.

Euroopan komissio (2018a). Energy union and climate. Internetsivu. Saatavilla [https://ec.europa.eu/commission/priorities/energy-union-and-climate\\_en](https://ec.europa.eu/commission/priorities/energy-union-and-climate_en), vierailtu 17.9.2018.

Euroopan komissio (2018b). EU Emissions Trading System (EU ETS). Internetsivu. Saatavilla [https://ec.europa.eu/clima/policies/ets\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_en), vierailtu 15.9.2018.

Fingrid (2018). Kysyntäjousto. Internetsivu. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/sahko-markkinat/kysyntajousto/>, vierailtu 18.9.2018.

Helen (2017). Isot lämpöpumput saapuvat Helsinkiin. Internetsivu. Saatavilla <https://www.helen.fi/uutiset/2017/lampopumput/>, vierailtu 20.9.2018.

Helsingin kaupunki (2018). Uutta Helsinkiä, Fiksu Kalasatama. Internetsivu. Saatavilla <https://www.uuttahelsinki.fi/fi/fiksukalasatama>, vierailtu 18.9.2018.

Höyrytys Oy (2019). Technical data Cogeneration Unit IET BIO 190 V01\_50. Saatavilla [http://hoyrytys.fi/images/stories/esitteet/iet\\_esimerkkikaaviot.pdf](http://hoyrytys.fi/images/stories/esitteet/iet_esimerkkikaaviot.pdf), vierailtu 25.2.2019.

Ilmatieteenlaitos (2019). Havaintojen lataus. Internetsivu. Saatavilla: <https://ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus#!/>, vierailtu 9.2.2019.

IPCC (2018). Special report: Global warming of 1.5 °C. Saatavilla: <https://www.ipcc.ch/sr15/>, vierailtu 21.3.2019.

Laitinen A., Rämä M., Airaksinen M. (2016). Jäähdytyksen teknologiset ratkaisut, Asiakasraportti VTT-CR-05415-16, Teknologian tutkimuskeskus VTT OY, Espoo.

Laki sähkön ja eräiden polttoaineiden valmisteverosta (2019). Laki sähkön ja eräiden polttoaineiden valmisteverosta 1260/1996. Ajantasainen lainsäädäntö, säädöksiä seurattu SDK 153/2019 saakka. Saatavilla <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1996/19961260>, vierailtu 6.2.2019.

Lempäälän energia (2019). LEMENE Lempäälän Energiayhteisö. Internetsivu. Saatavilla <http://www.lempaalanenergia.fi/content/fi/1/20152/Rahoitus.html>, vierailtu 5.2.2019

Lempäälän kehitys (2018). Marjamäki Business Park, yrityksen huippuosoite Pirkanmaalla. Internetsivu. Saatavilla: <https://www.lempaalankehitys.fi/tontit-ja-toimitilat/yritystontit/marjamaen-yritysalue/>, vierailtu: 10.9.2018

Lempäälän kunta (2018a). Kuntakeskuksen kaavoitus. Internetsivu. Saatavilla: <https://www.lempaala.fi/kuntainfo/keskustan-kehittaminen/kuntakeskuksen-kaavoitus/>, vierailtu 9.9.2018.



Lempäälän kunta (2017). Lempäälä – Kunta, joka sanoo kyllä, kuntastrategia 2018-2025. Saatavilla: [https://www.lempaala.fi/site/assets/files/1215/lempaala\\_kuntastrategia\\_14122017\\_final.pdf](https://www.lempaala.fi/site/assets/files/1215/lempaala_kuntastrategia_14122017_final.pdf), vierailtu 17.9.2018.

Motiva Oy (2018). Energiatehokkuussopimukset 2017-2025. Internetsivu. <http://www.energiatehokkuussopimukset2017-2025.fi/>, vierailtu 17.9.2018.

Motiva Oy (2019). Vedenkulutus taloyhtiöissä. Internetsivu. [https://www.motiva.fi/koti\\_ja\\_asuminen/taloyhtiot/energiacksperttitoiminta/tietoa\\_energian\\_ja\\_vedenkulutuksesta/vedenkulutus\\_taloyhtiössä](https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/taloyhtiot/energiacksperttitoiminta/tietoa_energian_ja_vedenkulutuksesta/vedenkulutus_taloyhtiössä), vierailtu 16.2.2019.

Pahkala, T., Uimonen, H., Väre, V. (2018). Joustava ja asiakaskeskeinen sähköjärjestelmä, Älyverkkotyöryhmän loppuraportti. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 33/2018. Saatavilla <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-346-7>

Pirkanmaan liitto (2018). EAKR-hankkeet ja kehittämistoiminta. Internetsivu. Saatavilla: <http://www.pirkanmaa.fi/aluekehittaminen/eakr-hankkeet-ja-kehittamistoiminta/>, vierailtu 17.9.2018.

Päästökauppalaki 2011/311 (2011). Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20110311>, vierailtu 15.9.2018.

Salmi, J. (2014). Adsorptiojäähdyttimen käytön kannattavuus kaukolämpöjärjestelmässä. Diplomityö. Lappeenranta teknillinen yliopisto, Teknillinen Tiedekunta, LUT Energia, Energiatekniikan koulutusohjelma. Saatavilla <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201401171158>

Sipilä, K., Kirjavainen, M., Ritola, J., Kivikoski, H. (2001). Liikenne- ja yleisten alueiden sulanapitojärjestelmät. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Saatavilla: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2001/T2113.pdf>, vierailtu 5.9.2018.

Suomen rakentamismääräyskokoelma (2018). Energiatehokkuus, Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Ympäristöministeriö. Saatavilla: <http://www.ym.fi/download/noname/%7BDFC56F1D-7C3A-404A-8E4F-4A77DE4C04F7%7D/133701>, vierailtu 6.9.2018.

Suomen ympäristökeskus (2018). HINKU-foorumi.fi – kohti hiilineutraalia kuntaa. Internet-sivu. Saatavilla: <http://www.hinku-foorumi.fi/fi-FI>, vierailtu 17.9.2018.

Sähkömarkkinalaki (2019). Sähkömarkkinalaki 9.8.2013/588. Ajantasainen lainsäädäntö. Säädöksiä seurattu SDK 153/2019 saakka. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588>, vierailtu 7.2.2019.

Tampereen kaupunkiseutu (2018). Tampereen kaupunkiseudun ilmasto- ja energiatavoitteet: Konsulttityön raportti. Saatavilla: [https://www.tampereenseutu.fi/site/assets/files/18328/ilmastotavoitteet\\_loppuraportti.pdf](https://www.tampereenseutu.fi/site/assets/files/18328/ilmastotavoitteet_loppuraportti.pdf), vierailtu 6.2.2019

Tenhunen, S. (2014). Kaasumoottori- ja kaasuturbiinikäyttöisten CHP-laitosten ja absorptiokylmäkoneiden väliset kytkennät. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, konetekniikan koulutusohjelma.

Työ- ja elinkeinoministeriö (2014). Energia- ja ilmastotiekartta 2050 – Parlamentaarisen energia- ja ilmastokomitean mietintö 16. päivänä lokakuuta 2014. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 31/2014. Saatavilla: <https://tem.fi/documents/1410877/2859687/Energia-+ja+ilmastotiekartta+2050+21102014.pdf>, vierailtu 17.9.2018.

Työ- ja elinkeinoministeriö (2017). Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 4/2017. Saatavilla: [http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79189/TEM-jul\\_4\\_2017\\_verkkojulkaisu.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79189/TEM-jul_4_2017_verkkojulkaisu.pdf?sequence=1&isAllowed=y), vierailtu 15.9.2018.

Työ- ja elinkeinoministeriö (2019). Rakennerahastot. Internet-sivu. Saatavilla: <https://www.rakennerahastot.fi/>, vierailtu 6.2.2019.

Valtioneuvosto (2017) Valtioneuvoston asetus keskisuurten energiantuotantoyksiköiden ja -laitosten ympäristönsuojeluvaatimuksista. Valtioneuvoston asetus 1065/2017. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171065>, vierailtu 7.2.2019

Valtioneuvosto (2009) Valtioneuvoston asetus maakaasun käsittelyn turvallisuudesta 551/2009. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2009/20090551>, vierailtu 7.2.2019.

Valtiovarainministeriö (2018). Valtion talousarvioesitykset 2018, määrärahat, Työ- ja elinkeinoministeriö, Energiapolitiikka, Energiatuki. Internetsivu. Saatavilla: [http://budjetti.vm.fi/indox/sisalto.jsp;jsessionid=C692748497FBB079F9487C7872E79318?year=2018&lang=fi&main-doc=/2018/tae/valtiovarainministerionKanta/valtiovarainministerionKanta.xml&open-node=0:1:241:991:1095:1101](http://budjetti.vm.fi/indox/sisalto.jsp;jsessionid=C692748497FBB079F9487C7872E79318?year=2018&lang=fi&main-doc=/2018/tae/valtiovarainministerionKanta/valtiovarainministerionKanta.xml&open-node=0:1:241:991:1095:1101;)., vierailtu 23.2.2019.

Ventä, S. (2014). Sulanapidon tehonmitoitus. Insinööritö. Metropolia Ammattikorkeakoulu, Talotekniikan tutkinto-ohjelma. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/72202/Insinoorityo%20Sami%20Venta%2008\\_04\\_2014.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/72202/Insinoorityo%20Sami%20Venta%2008_04_2014.pdf?sequence=1), vierailtu 5.9.2018.

Villanen, M. (2018). Keskustan kehittäminen – Asukasmäärä. Powerpoint-esitys, julkaisematon. Lempäälän kunta, Yhdyskunnan palvelualue, Kaavoitus.

Ympäristöministeriö (2018). Kansainväliset ilmastoneuvottelut. Internet-sivu. Saatavissa: [http://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto\\_ja\\_ilma/Ilmastonmuutoksen\\_hillitseminen/Kansainvaliset](http://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastonmuutoksen_hillitseminen/Kansainvaliset) , vierailtu: 11.9.2018.

Ympäristönsuojelulaki (2019). Ympäristönsuojelulaki 27.6.2014/527. Ajantasainen lain-säädäntö, säädöksiä seurattu SDK 153/2019 saakka. Saatavissa <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20140527> , vierailtu 7.2.2019.